INJERTOS PARA EL CORAZON • CAMBIO CLIMATICO BRUSCO



ENERO 2005
6,00 EURO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

COMPUTACION EN AGUJEROS NEGROS

LA ENSEÑANZA DE LA LECTURA

ESTRUCTURA DEL CEREBRO HUMANO

BRECHAS EN LA DEFENSA ANTIMISIL

LA RED COSMICA

MUSICA Y CEREBRO



INVESTIGACION y CIENCIA

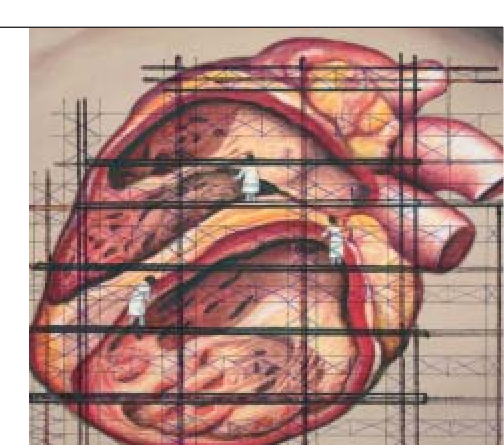
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Enero de 2005

Número 340

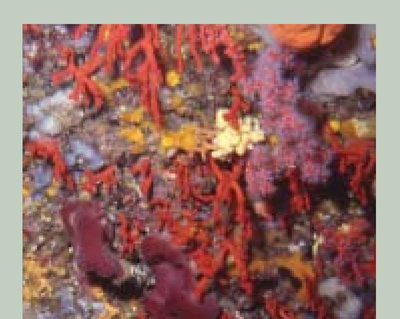














DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

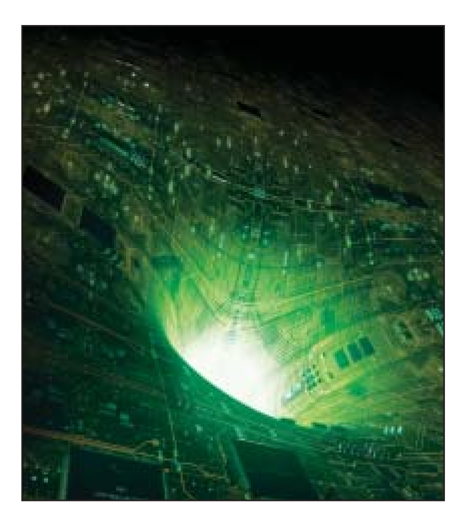
Madrid:
GM Exclusivas Publicidad
Menorca, 8, Bajo, Centro Izda.
28009 Madrid
Tel. y Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *La red cósmica*; Andrés Lewin Richter: *Música y cerebro*; Manuel Puigcerver: *Cambio climático brusco*; Cristóbal Pera: *Injertos para el corazón*; Luis Bou: *Computación en agujeros negros*; David Costa Miserachs: *Estructura del cerebro humano*; J. Vilardell: *Brechas en la defensa antimisil*, *Hace...*, *Apuntes*, *Curiosidades de la física e Ideas aplicadas*



Portada: Kenn Brown

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Extranjero	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

...cincuenta años

CIENTÍFICOS ANTISOCIALES. «¿Deben considerarse como defectos de personalidad rayanos en lo anormal los rasgos sociales que caracterizan a numerosos científicos? Respuesta: no. En nuestra muestra poblacional, las crisis mentales o emocionales no resultaron más corrientes entre los científicos que entre los no científicos. A lo sumo, en el grupo escogido, físicos e ingenieros aparecen en el polo opuesto al de hombres de negocios y abogados, respecto a capacidades, intereses ocupacionales y comportamiento social. Esas diferencias básicas entre las personalidades podrían explicar buena parte de las fricciones entre los científicos y los políticos.»

ABAJO EL AMOR. «En un estudio de 1297 telefonistas, los investigadores descubrieron que el perfil típico del trabajador que solicita la baja por enfermedad correspondía a una mujer casada, viuda o divorciada cuyas esperanzas se habían cifrado en ser ama de casa y madre. Privadas del apoyo del cónyuge, por muerte, abandono o incompatibilidad, se habían visto obligadas a seguir trabajando, con frecuencia mientras criaban a sus hijos. Entre los telefonistas con menos bajas por enfermedad, predominaban las mujeres solteras con escasa propensión al matrimonio y cuyas ambiciones no iban mucho más allá de la modesta satisfacción por su trabajo.»

HELICÓPTEROS. «La versatilidad y usos del helicóptero resultan formidables y van en aumento, pero aún no se aplican al transporte de masas. El futuro del helicóptero se basa en su singular capacidad de despegar del centro de una ciudad densamente poblada, saltarse los atascos del tráfico y aterrizar en un centro igualmente denso. Logra hacerlo a una velocidad aceptable y con poquísimo riesgo. La compañía aérea Sabena demostró que un helicóptero que vuele a una velocidad de crucero de sólo 120 kilómetros por hora podría llevar pasajeros desde el centro de Bruselas a Londres con mayor rapidez que un avión comercial que volara a 400 kilómetros por hora, cuyos pasajeros deberían trasladarse en taxi a y desde los aeropuertos.»

...cien años

EQUIDOS NERVIOSOS. «Un residente en Canadá propone apaciguar los caballos asustadizos mediante caballos de juguete a escala natural sujetos al frente de los automóviles (*véase la figura*), de forma que éstos ofrezcan la apariencia de vehículos hipomóviles. Además de engañar a los caballos medrosos y nerviosos, el señuelo lleva en la cabeza un reflector para usar de noche y en la boca una bocina de automóvil.»

LA GUERRA RUSO-JAPONESA. «*Scientific American* lamenta profundamente que, tal como revela la presente guerra, los avances científicos, en vez de mitigar los horrores de la guerra, los hayan multiplicado. El sueño de los filántropos, de que la ciencia había convertido la guerra moderna en algo tan espeluznante y aterrador que imposibilitaría su continuación, se desvanece ante el horrible panorama de Port Arthur, donde los cuerpos de miles de valientes se pudren sobre las faldas nevadas de las fortificaciones, sin que el afán por el triunfo bélico permita una tregua para su sepultura.»

...ciento cincuenta años

ORBITAS COMETARIAS. «Las órbitas de todos los planetas, y probablemente de casi todos los cometas, describen elipses, en uno de cuyos focos se encuentra el Sol. No puede existir un cuerpo atractivo en el foco superior de la órbita de un cometa que se sepa periódica, pues resulta imposible que un cuerpo permanezca inmóvil en ese punto. La estrella fija más próxima cuya distancia ha sido determinada, *Alfa Centauro*, se halla a más de doscientos mil radios de la órbita terrestre alrededor del Sol. La luz, viajando continuamente a más de 300.000 kilómetros por segundo, requeriría más de 3 años y cuarto para cubrir ese trayecto. Así pues, ¿cuánto tiempo tardaría un cometa en completar un viaje de ida y vuelta? Que a nuestro sistema no llegan cometas desde las regiones de la estrella fija resulta bastante claro.»



Caballos de juguete para apaciguar caballos de verdad, 1905.

ENDOCRINOLOGIA

Violencia acuciante

Entre las hormonas del estrés y la vía cerebral que controla la violencia parece existir una relación de mutuo fortalecimiento. En las ratas, la estimulación eléctrica de esa ruta activa la reacción adrenocortical ante el estrés (“lucha o huye”). Para que se dispare esa reacción, se requiere la confrontación con otro congénere. De igual modo, podemos despertar la agresividad de los múridos mediante la inyección de corticosterona, la hormona del estrés. Nos encontramos, pues, con un círculo vicioso: la conducta violenta estimula la secreción de hormonas del estrés, que propician más violencia, y así sucesivamente.

—*Aimee Cunningham*



La tensión nerviosa y la violencia forman un círculo vicioso.

REUTERS/CORBIS

ETOLOGIA

La simulación castigada

Hay animales que muestran su esplendor en costosos despliegues de fuerza o exhibiciones. Pensemos en la cola del pavo real. Las manifestaciones de otros animales, sin embargo, diríanse exentas de coste especial. ¿Mienten acaso? No. El engaño les saldría muy caro desde el punto de vista social, vienen a declarar los etólogos. Los entomólogos han observado el primer dato inequívoco que respalda esa idea. En las hembras de avispa papelera, descubrieron que las que portaban sobre el aparato bucal marcas negras más fragmentadas o en mayor número tendían a salir victoriosas en su lucha por el dominio. Pintaron luego en algunas hembras las marcas propias de un dominio superior o inferior. ¿Qué ocurrió? Ambos grupos de farsantes sufrieron un mayor acoso que las hembras control. El engaño no era, pues, bien recibido. Se sospecha que alguna clave química o conductual termina por delatar a las embaucadoras.

—*J. R. Minkel*

Las avispas papeleras desaprueban las suplantaciones.

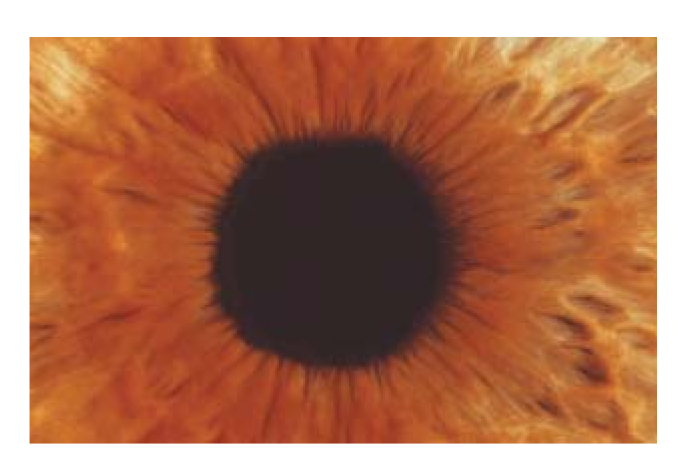
E. A. TIBBETS

BIOLOGIA

Células madre oculares

Los humanos poseemos auténticas células madre retinianas autorregeneradoras. En el banco de ojos de la Universidad de Toronto, los investigadores se aprestaron a crear cultivos celulares. En el ensayo descubrieron que, aproximadamente, una de cada 500 células, procedentes del anillo negro que circunda al iris, se dividía indefinidamente y se engendraban todos los tipos de células retinianas. (En estudios anteriores se habían encontrado células madre retinianas de capacidad limitada, carentes de potencial para una división indefinida y que se transformaban sólo en unos pocos tipos de células.) Al ser trasplantadas a embriones de ratón o de pollo, las células madre se transformaban en células del tipo que hallaban en el embrión en cuestión y en su fase concreta de desarrollo. El próximo paso a dar será el implante celular en ratones con retinas degenerativas; nos permitirá averiguar si restablecen la función y estudiar de qué modo podríamos activar y manipular dichas células.

—*J. R. Minkel*



El iris, una fuente potencial de células madre.

DAVID PARKER *Science Photo Library*

SALUD

Dispersión del mercurio



El mercurio es neurotóxico. Inquieta en especial su efecto sobre el desarrollo de los fetos. De acuerdo con la investigación epidemiológica, un número considerable de mujeres estadounidenses en edad de procrear alojan en sus organismos una cantidad excesiva de ese metal. El estudio de marras se ha centrado en muestras de cabello de unas 1500 personas de todas las edades. Un quinto de los sujetos estudiados poseía un nivel de mercurio superior al recomendado por la Agencia de Protección Medioambiental, una parte por millón. Ningún otro contaminante, que se sepa, somete a un porcentaje tan alto de la población de EE.UU. a unos niveles de exposición superiores a los recomendados por las autoridades federales. Los mayores focos de mercurio suspendido en el aire son las centrales eléctricas que queman carbón.

—Charles Q. Choi

La exposición al mercurio se halla muy extendida.

DIRK WIERSMA *Science Photo Library*

ZOOLOGIA

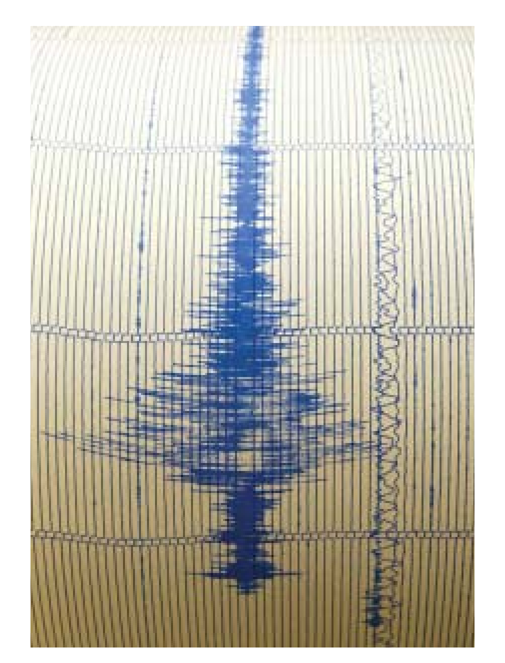
Aun sin oxígeno

Sin oxígeno, pocos vertebrados sobreviven más de unos minutos. Algunos, como la tortuga de agua dulce, ralentizan drásticamente su corazón para seguir vivos. La carpa cruciana (*Carassius carassius*), del mismo género que uno de los peces más comunes en las peceras, el pez rojo, carpa dorada o carpín, puede vivir sin apenas oxígeno durante al menos cinco días, sin que el corazón deje de latir perfectamente. Lo consigue transformado el ácido láctico, perjudicial subproducto metabólico, en el mucho menos dañino etanol. El corazón quizá contribuya a la circulación del etanol por las branquias y a su descarga en el agua. Gracias a esta capacidad, la carpa cruciana sobrevive al invierno escandinavo. De su investigación podrían inferirse claves para salvar la vida de quienes se quedan sin oxígeno suficiente por un ataque cardíaco o un ataque cerebrovascular.
—Charles Q. Choi



La escasez de oxígeno no es un problema para algunos peces.

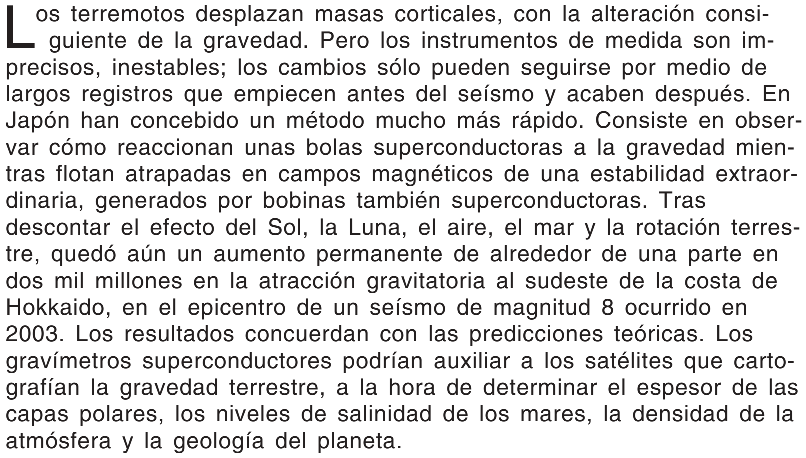
CORBIS





GEOFISICA

Seísmos y gravedad



Los terremotos desplazan masas corticales, con la alteración consiguiente de la gravedad. Pero los instrumentos de medida son imprecisos, inestables; los cambios sólo pueden seguirse por medio de largos registros que empiecen antes del seísmo y acaben después. En Japón han concebido un método mucho más rápido. Consiste en observar cómo reaccionan unas bolas superconductoras a la gravedad mientras flotan atrapadas en campos magnéticos de una estabilidad extraordinaria, generados por bobinas también superconductoras. Tras descontar el efecto del Sol, la Luna, el aire, el mar y la rotación terrestre, quedó aún un aumento permanente de alrededor de una parte en dos mil millones en la atracción gravitatoria al sudeste de la costa de Hokkaido, en el epicentro de un seísmo de magnitud 8 ocurrido en 2003. Los resultados concuerdan con las predicciones teóricas. Los gravímetros superconductores podrían auxiliar a los satélites que cartografían la gravedad terrestre, a la hora de determinar el espesor de las capas polares, los niveles de salinidad de los mares, la densidad de la atmósfera y la geología del planeta.

—Charles Q. Choi

Los temblores modifican localmente la fuerza gravitatoria.

CHARLES REX ARBOGAST *AP Photo*

La enseñanza de la lectura

La búsqueda del mejor método para enseñar a leer sigue preocupando a muchos educadores. La investigación científica permite actualmente encontrar respuesta a muchos de los dilemas que se plantean

Jesús Alegría, Marisol Carrillo y Emilio Sánchez

La enseñanza de la lectura ha recibido una atención considerable en los últimos años por parte de diversas disciplinas: la psicología, la lingüística, las neurociencias y la inteligencia artificial, entre otras. Las investigaciones realizadas han creado un sólido cuerpo de conocimientos sobre la naturaleza del acto de leer, sobre el proceso de adquisición de esta competencia y sobre las dificultades que encuentra el aprendiz en tal proceso. No obstante, y reflejando la enorme importancia que tiene en nuestra sociedad la alfabetización plena de toda la población, los debates sobre los métodos de enseñanza siguen siendo intensos.

¿Hay que enseñar a leer? Plantear esta pregunta presupone que pudiera no ser necesario hacerlo, que se puede aprender a leer como se aprende a hablar, es decir, sin enseñanza organizada sistemáticamente. Todos los niños adquieren su lengua materna sin programas de enseñanza ni maestros. Basta con la presencia de adultos que hablan sin intención de enseñar para que los niños aprendan sin voluntad de aprender. Aprender a leer, por el contrario, exige clases, programas, profesores, y a pesar de todos estos esfuerzos, plantea problemas a una proporción grande de niños. Sin embargo, algunos autores defienden la idea de que aprender a leer y adquirir la lengua materna no son conquistas fundamentalmente diferentes. Es cierto que muchos niños aprenden a leer con una facilidad asombrosa. Pero, junto a éstos, se encuentran otros para quienes esta tarea es casi irrealizable. Tales diferencias individuales no se observan en la adquisición de la lengua materna, lo que respalda la idea de que aprender a leer y aprender a hablar entrañan mecanismos diferentes.

Existen dos familias de métodos de enseñanza de la lectura que se suelen presentar como mutuamente excluyentes: los métodos "fónicos", que dan prioridad a la enseñanza del principio alfabético, y los métodos "globales" y sus derivados, que dan prioridad al significado que transmiten los mensajes escritos. Veremos que no existe ningún fundamento para aceptar esta oposición. Aunque la confrontación entre defensores de uno y otro método es particularmente enconada en el mundo anglosajón, por razones que aparecerán más adelante, los planteamientos también son semejantes en las comunidades de lengua castellana.

El método fónico

El método fónico se propone explotar los beneficios del principio alfabético que está en la base de nuestro sistema de escritura: que las unidades utilizadas en la escritura, letras y grupos de letras, denominadas grafemas (la "c" de casa y la "ch" de chal, por ejemplo), representan de manera más o menos sistemática las unidades fonológicas de la lengua denominadas fonemas. El método fónico de enseñanza de la lectura considera que el principio alfabético debe ser presentado al aprendiz de manera *explícita*, *sistemática* y *temprana*. *Explícita* significa que el maestro debe ayudar al alumno a comprender la relación que existe entre grafemas y fonemas sin esperar que éste descubra espontáneamente tal relación. *Sistemática* quiere decir que la enseñanza debe organizarse siguiendo un orden preciso, determinado por consideraciones teóricas y prácticas que toman en cuenta las dificultades que plantea el aislar ciertos fonemas. Los fonemas no son "los sonidos materiales" de que está hecha el habla, sino entidades abstractas. Por ejemplo, el fonema /p/ es una abstracción: es lo que las palabras "papa", "pipa" y "pe" (el nombre de la letra que lo representa) tienen en común al comienzo. Este fonema no puede ser concretizado

materialmente en un sonido porque es imposible pronunciarlo sin una vocal. Por esta razón, la enseñanza de la correspondencia entre grafemas y fonemas será más exitosa si comienza con las vocales y las consonantes fricativas que pueden ser aisladas, y se espera que esto ayude al niño a comprender el principio alfabético. Por último, t*emprana* se refiere a que el código alfabético debe presentarse desde el comienzo del programa de enseñanza.

El fundamento teórico de este método es que el dominio del sistema de correspondencias pone a disposición del niño una herramienta (leer) que le permitirá comprender el significado de cualquier palabra que encuentre. De ahí la noción de *productividad* que caracteriza al código alfabético.

Entre las críticas que se han formulado hacia este método, principalmente por defensores de propuestas metodológicas alternativas, cabe destacar tres. La primera: resulta poco estimulante para el aprendiz; le aleja de la dimensión funcional de la lectura: extraer significado y comunicar. En segundo lugar, su falta de eficacia, particularmente en algunas lenguas, como el inglés, en las que el código alfabético es poco productivo a causa de la falta de regularidad de las relaciones grafema-fonema. Esta crítica es de menos importancia en sistemas ortográficos más regulares, como el del castellano. Por último, algunos autores afirman que los niños poseen conocimientos intuitivos sobre la escritura (qué representa, cómo lo hace, para qué sirve) que el sistema de enseñanza fónico ignora, lo que podría llevar al niño a no operar con lo que ya posee y a adoptar una actitud pasiva ante el nuevo aprendizaje.

Los métodos globales

Los métodos globales aparecen como un intento de superar algunas de estas críticas. La proposición principal es que las unidades enseñadas sean las palabras completas. De esta forma se evitan los problemas de la falta de regularidad del código y, además, el aprendizaje se centra en unidades que tienen significado abandonándose las que no lo tienen, los grafemas y los fonemas.



1. LA ENSEÑANZA DE LA LECTURA, ¿debe basarse en la asociación de grafemas y fonemas, o ha de empezar ya por las palabras completas?

TINA WEST

En un programa clásico de lectura global se empieza enseñando al aprendiz varias decenas de palabras hasta que las reconozca directamente, es decir, sin recurrir a la mediación fonológica ("luna" →/luna/, "sol"→/sol/, etc.). El vocabulario visual así adquirido es utilizado por los alumnos para leer y componer frases, pero estas actividades están limitadas por la cantidad de palabras memorizadas. Ante una palabra desconocida el aprendiz esta obligado a adivinar su significado; el maestro lo animará a practicar esta actividad y no a buscar la correspondencia entre grafemas y fonemas. Versiones menos radicales del método plantean que el crecimiento del vocabulario visual requiere realizar discriminaciones cada vez más finas que pueden inducir al alumno a reparar en la fonología. Por ejemplo, para memorizar el significado de palabras como "luna", "cuna", "duna", "tuna", etc., inferir el valor fonológico de la primera letra es importante. De esta manera, cabría suponer que si bien las correspondencias grafema-fonema no se enseñan (al menos explícita y sistemáticamente), el alumno pueda llegar a operar con ellas de algún modo.

No obstante, los defensores de esta metodología asumen el principio teórico, defendido por F. Smith entre otros, de que la fonología no forma parte de los procesos que intervienen en la identificación de palabras escritas por parte del lector experto. Más específicamente, argumentan que la mediación fonológica hace más lento el acceso al significado y, consecuentemente, debería ser desterrada de la enseñanza. Es importante anticipar que estas ideas han sido refutadas empíricamente durante los últimos años, como veremos enseguida.

En la línea de los métodos globales, la opción denominada "lenguaje integrado" pone el énfasis en el uso del lenguaje escrito en situaciones comunicativas reales. Según esta posición, el papel del maestro es el de ayudar al alumno a explorar y descubrir progresiva-

mente las convenciones del lenguaje escrito a través de su uso en contextos naturales. Al lector principiante que no consigue leer un mensaje se le animará para que adivine su significado explotando todos los recursos disponibles: palabras que reconoce, sus propios conocimientos lingüísticos e informaciones sobre el tema, las ilustraciones que acompañan el mensaje, la comprensión de las intenciones del autor, etc. Kennet Goodman condensó esta noción en una frase célebre: "Leer es practicar un juego de adivinanzas psicolingüísticas". Esta afirmación tiene como consecuencia que el reconocimiento de palabras sea considerado un proceso secundario, una opción, en la comprensión de la lengua escrita. Para los defensores del lenguaje integrado no es necesario leer cada una de las palabras de un texto, pues el lector posee un poder predictivo basado en la redundancia del lenguaje y una capacidad de interpretación basada en sus conocimientos previos. Capacidad predictiva y conocimientos previos permiten al lector seleccionar de forma "inteligente", según sus necesidades e intereses, qué leer y qué dejar de lado. Esta proposición ha tenido una influencia considerable en la enseñanza de la lectura.

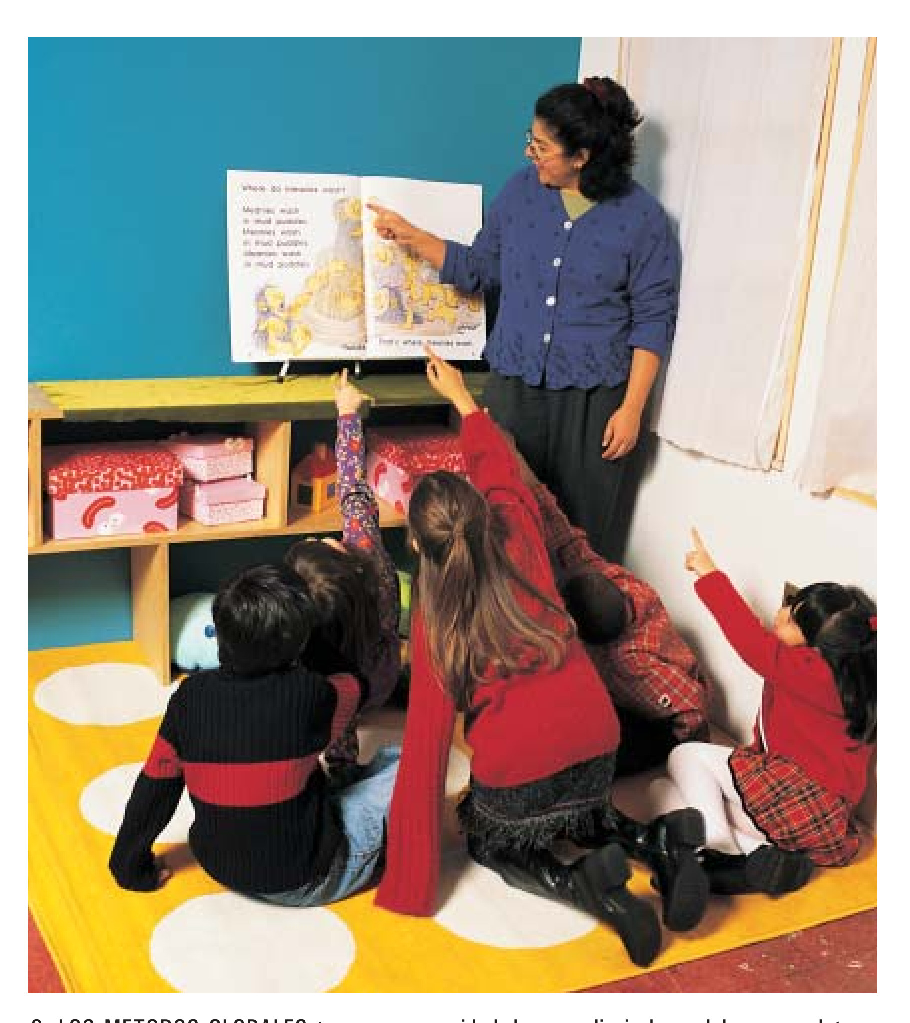
En el mundo hispanohablante se ha desarrollado otra metodología comunicativa con raíces en la teoría evolutiva constructivista de Jean Piaget. El fundamento de esta propuesta es que los niños que desde muy pequeños entran en contacto con la lengua escrita desarrollan espontáneamente, esto es, sin enseñanza formal, ideas sobre lo que representa la escritura en el plano formal y funcional: qué distingue lo escrito de otras formas de representación gráfica, qué representan los signos ortográficos, para qué sirve la escritura. Los constructivistas han puesto al descubierto regularidades importantes en la evolución de las ideas que el niño desarrolla sobre la lengua escrita. A una edad temprana, por ejemplo, distingue entre lo que es un dibujo y lo que es una palabra escrita y, de manera progresiva, establece relaciones entre lo oral y lo escrito hasta llegar a formular (implícitamente) hipótesis fonológicas. Por ejemplo, la llamada "hipótesis silábica" supone que las sílabas que componen las palabras deben tener una representación gráfica diferenciada. Así /cristina/ necesitará tres signos gráficos y /pedro/ dos.

La metodología constructivista plantea la enseñanza a partir de las "hipótesis" del niño y propicia en los aprendices el empleo de sus propios recursos para escribir. Es importante subrayar que el avance del alumno supone un acercamiento progresivo al código alfabético, y que si bien las reglas de transformación grafema-fonema, y viceversa, no se enseñan de manera sistemática, el aprendiz tendrá inevitablemente que descubrirlas o codescubrirlas con la ayuda del enseñante. Este crea situaciones que favorezcan la evolución de las ideas personales del niño sobre el lenguaje escrito. Por el contrario, en la metodología fónica, y también en la global, es el enseñante el que planifica la secuencia con la que se llevarán a cabo los aprendizajes.

Pero una revisión crítica de las opciones metodológicas presentadas no puede dejar al margen a las aportaciones bien consolidadas de la investigación sobre los mecanismos o procedimientos de lectura de las palabras, su adquisición y sus dificultades.

¿Cómo leemos las palabras?

Esta cuestión puede parecerle extraña al lector experto. Nuestra impresión es que la identificación de una palabra escrita es instantánea y no deja lugar al estudio de procesos que podrían tomar tiempo y consumir energía por parte del lector. Sin embargo, el análisis experimental de la lectura de palabras demuestra



TINA WEST

2. LOS METODOS GLOBALES toman como unidad de aprendizaje las palabras completas. La irregularidad ortográfica del inglés podrá ser una razón para optar por este enfoque en esa lengua.

que no es así. Por ejemplo, las palabras frecuentes se identifican más deprisa que las menos frecuentes y los estudios de laboratorio muestran que este y otros factores, tales como la longitud de la palabra, su estructura ortográfica o la existencia de "vecinos" ortográficos o fonológicos (palabras similares ortográfica o fonológicamente; por ejemplo, son vecinas de "pato" las palabras gato, palo, pata, pito...), determinan de manera previsible la duración y la precisión del proceso de identificación.

Los modelos elaborados para explicar estos resultados consideran que identificar una palabra consiste en establecer una conexión entre su forma ortográfica en el texto y los conocimientos que el lector posee en su memoria léxica sobre dicha palabra; conocimientos principalmente semánticos (su significado), sintácticos (tipo gramatical, género, etc.) y fonológicos (su pronunciación). Esta conexión se puede realizar de dos formas diferentes. La primera tiene lugar de manera directa y se produce cuando la palabra que hay que identificar forma parte del repertorio de palabras memorizadas que posee el lector, el denominado *léxico ortográfico*. La segunda procede por *ensamblaje fonológico*, esto es traduciendo los elementos ortográficos de la palabra, letras y grupos de letras, a la forma fonológica correspondiente. Se trata en este caso de un reconocimiento indirecto que se produce a través de la representación fonológica de la palabra.

Actividad automatizada

Estos dos procesos funcionan de manera paralela y automática, lo que quiere decir que los procesos implicados en la lectura de palabras se ponen en marcha obligatoriamente en cuanto los ojos del lector fijan una palabra escrita. La voluntad del lector no desempeña ningún papel en este proceso y, por ello, no se puede evitar leer una palabra una vez que ha entrado en el campo visual, ni tampoco decidir si la palabra será procesada fonológica u ortográficamente.

G. Van Orden y sus colaboradores han demostrado elegantemente la intervención de la fonología en la lectura de palabras por medio de una tarea de toma de decisión semántica: contestar rápidamente si una palabra escrita pertenece o no a una categoría particular; por ejemplo, decidir si se trata o no de una flor. Los resultados muestran que palabras como "rows" (rema), que se pronuncia igual que "rose" (rosa), producen a menudo el error de apretar el botón "sí". Por supuesto que el lector "sabe" que rows no es un nombre de flor, pero la tendencia a responder "sí" revela que la fonología de rows, que se activa de modo automático en el proceso de identificación de la palabra escrita, interfiere negativamente en la tarea semántica, sin que los sujetos puedan evitarlo. Este fenómeno, llamado "efecto de homofonía", se observa también cuando se presentan pseudopalabras. Por ejemplo, en castellano, la pseudopalabra "habión", homófona de "avión", produciría interferencias en la tarea de decisión semántica "objeto que vuela" generando una tendencia errónea a responder "sí".

Cabe agregar que los estudios minuciosos de Rayner y sus colaboradores sobre la manera en que los ojos recorren un texto revelan aspectos de esta actividad que, de nuevo, no coinciden con nuestras intuiciones de lector. Tenemos la impresión de que los ojos se deslizan de manera continua a lo largo de las líneas de texto, pero la realidad es muy diferente. Los ojos proceden de manera discontinua: se detienen en la palabra que leen durante unos 200-250 milisegundos como promedio (fijación ocular) y saltan, literalmente, a la siguiente en 30 ms (movimiento sacádico). Los estudios sobre los movimientos oculares del lector experto muestran que se fijan casi todas las palabras de un texto y que la duración de las fijaciones depende del trabajo de identificación que exija la palabra (es menor en las palabras frecuentes que en las que no lo son tanto).

Todos estos trabajos muestran que el procesamiento de las palabras escritas, aisladas o componiendo un texto, es una actividad automatizada en el lector experto. Sus cualidades intelectuales tienen poco o nada que ver en tal proceso. Por supuesto, el lector las ejerce en los procesos de comprensión de los textos: aplica sus conocimientos lingüísticos y conceptuales para extraer las ideas, relacionarlas entre sí y con los conocimientos previos, para realizar inferencias, e incluso para elegir inteligentemente dónde

Comparación de métodos de enseñanza en Estados Unidos

Son numerosas las investigaciones que muestran las ventajas de la enseñanza fónica en la lengua inglesa. En los EE.UU. hay una larga tradición de comparar los resultados obtenidos con diferentes métodos de enseñanza de la lectura. Entre los estudios recientes se encuentra el realizado por la Academia Nacional de Ciencias/ Consejo Nacional de Investigaciones, que, bajo el auspicio del Departamento de Educación, revisó más de 700 publicaciones. Llegó a la conclusión de que el reconocimiento de las palabras escritas es muy difícil si no se dispone del conocimiento de cómo las letras representan de forma sistemática a los sonidos. Además, sin tal conocimiento no es posible el progreso en el aprendizaje. Si un niño no puede apoyarse en el principio alfabético, el reconocimiento de palabras será lento y laborioso, lo que dificultará la comprensión de los textos.

Así mismo el Panel Nacional sobre la Lectura, organizado por el Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano, de Estados Unidos, realizó un metaanálisis de una selección de 38 estudios bien controlados sobre instrucción fónica. Los resultados mostraron que la instrucción fónica sistemática aumenta el éxito de los niños en el aprendizaje de la lectura y que resulta significativamente más efectiva que la instrucción que incluye poca, o ninguna, enseñanza fónica.

Otra importante publicación americana, *How Psychological Science Informs the Teaching of Reading*, recoge una revisión excelente de los datos más actuales y significativos en el tema que nos ocupa.



3. ANTES DE APRENDER A LEER los niños toman contacto con los textos escritos. Se familiarizan con los relatos a través de los cuentos e historias que les leen los adultos. Aprenden sobre la forma gráfica de las palabras y su disposición en las páginas, adquieren nuevo vocabulario y nuevas formas de expresión que son propias del lenguaje escrito. Estos conocimientos desempeñan un papel muy importante en que la lectura sea una experiencia motivadora y plena de significado.

JESUS ALEGRIA, MARISOL CARRILLO Y EMILIO SANCHEZ

leer en función de sus intereses y necesidades.

Enseñar a un niño a leer consiste, por necesidad, en ayudarlo a elaborar un procesador de palabras escritas automatizado, pero es también enseñarle a encontrar las claves que permiten la comprensión de los textos y a buscar información inteligentemente en función de sus necesidades. Estos múltiples aspectos que engloba la enseñanza de la lectura son del todo diferentes y buena parte del debate sobre los métodos proviene de que los defensores de uno u otro hablan de enseñar a leer haciendo referencia a cuestiones diferentes: crear y automatizar el procesador de palabras escritas, por una parte, y enseñarle al niño a servirse con inteligencia de él, por otra.

La conciencia fonológica

El proceso de aprendizaje que lleva a la adquisición de los mecanismos de identificación de palabras es uno de los mejor documentados de la psicología cognitiva. En el caso del lector experto vimos que existen dos procedimientos para la identificación de palabras escritas, uno directo u ortográfico y otro indirecto o fonológico. En este último caso el sistema atribuye fonemas a las letras o grupos de letras, y para aprender a hacer esta operación el aprendiz tiene que comprender el código alfabético, lo que le exige haber aislado mentalmente los fonemas. Sólo así el niño será capaz de concebir las palabras "sol" y "gol" como formadas cada una por tres fonemas, de los cuales es el primero el que distingue una de otra. Se ha dado el nombre de *conciencia fonológica* a esta capacidad. No se trata sólo de poder discriminar auditivamente palabras que presentan diferencias fonológicas mínimas; esta última capacidad forma parte de los mecanismos de procesamiento del habla que se desarrollan de forma natural y el niño la posee incluso antes de empezar a hablar. Si no fuera así, no podría distinguir entre las palabras que oye y establecer correspondencias sistemáticas entre cada una de ellas y sus referentes. La conciencia fonológica se desarrolla más tarde y requiere un tipo de reflexión consciente que permita aislar mentalmente las unidades fonológicas que constituyen las palabras.

Ciertos aspectos de la conciencia fonológica preceden en su desarrollo al aprendizaje de la lectura. Así se ha demostrado que los niños prelectores son capaces de segmentar una palabra en sílabas dando un golpecito o palmada por sílaba. Con unos pocos ejemplos y algo de entrenamiento la mayoría de los niños de 4 y 5 años son capaces de hacer esta tarea. La "hipótesis silábica" (cada sílaba tiene que ser representada por un signo gráfico), descrita por los constructivistas, se basa en esta habilidad. Es evidente que el niño no podría desarrollar la hipótesis si no fuera capaz de concebir explícitamente las palabras como secuencias de sílabas. La conciencia de otros aspectos fonológicos del habla, tales como la rima, también se observan antes de aprender a leer. Los niños prelectores son capaces de realizar tareas que exigen esta habilidad. Por ejemplo, se les presentan 3 dibujos, "sol", "gol" y "mar", y se les pide que identifiquen el intruso ("mar" en este caso), para lo cual el niño tiene que reconocer que las palabras "sol" y "gol" riman entre ellas pero no con "mar".

Sin embargo, las tareas que exigen la segmentación en fonemas son mucho más difíciles. Así, la supresión del fonema inicial, tarea, clásica en este dominio, en la que se propone al niño una palabra como /sol/, a lo que tiene que responder /ol/, no está al alcance de los prelectores. Esta tarea implica la conciencia *fonémica*, que es el aspecto más exigente de la conciencia fonológica. La conciencia fonémica es necesaria para la comprensión del código alfabético, ya que para entender lo que representan las letras de una palabra escrita el aprendiz tiene que ser capaz de aislar mentalmente los fonemas correspondientes en la palabra hablada. Esta habilidad no se desarrolla de manera espontánea, tal como han podido demostrar experimentalmente J. Morais y sus colaboradores con adultos iletrados: fueron incapaces de realizar la tarea de suprimir el fonema inicial. Por el contrario, un grupo de adultos del mismo entorno social que habían sido alfa-

betizados pudo llevarla a cabo. Del mismo modo, Ch. Read y sus colaboradores demostraron que los lectores chinos que sólo utilizan el sistema logográfico propio de esta lengua, que no representa fonemas, son incapaces de realizar la tarea de supresión descrita.

Estos resultados tienen una incidencia importante en la enseñanza de la lectura puesto que indican: a) que la conciencia fonémica no se desarrolla espontáneamente, b) que la estructura fonémica del habla tiene que ser explícitamente revelada al aprendiz lector y c) que esto no ocurre en general si no es en el contexto del aprendizaje de la lectura en un sistema alfabético. Además, investigaciones como la realizada por uno de los autores, Jesús Alegría, y sus colaboradores han mostrado que la enseñanza de la lectura con el método global durante el primer año no permite al niño adquirir conciencia fonémica.

También B. Byrne realizó una serie de experimentos por medio de una versión de laboratorio de la enseñanza global de la lectura, en la que enseñaba a unos preescolares a memorizar parejas de palabras tales como "fat" (gordo), asociándola con un dibujo que representaba un niño gordo, y "bat" (murciélago), asociada al dibujo correspondiente. Para verificar si de este aprendizaje el niño podía deducir espontáneamente que la letra "f" de "fat" correspondía al fonema /f/, puesto que es el sonido que distingue fat de bat, el autor proponía al niño una nueva palabra escrita, "fun" (diversión), y le preguntaba si ahí decía /fun/ o /bun/ (bocadillo). Los prelectores fueron incapaces de hacer esta transferencia. Además, una serie de controles experimentales suplementarios permitieron concluir que esta incapacidad es debida a la falta de conciencia fonémica en los aprendices, ya que estos mismos niños eran capaces de realizar tareas equivalentes con unidades que representaban palabras y no fonemas.

Por otra parte, los estudios longitudinales (es decir, que continúan a lo largo del tiempo) del entrenamiento metafonológico en distintas lenguas alfabéticas, incluido el español, han permitido demostrar que la relación entre la conciencia fonológica y el aprendizaje de la lectura es de tipo causal: el entrenamiento de preescolares en tareas que desarrollan la conciencia fonológica favorece la adquisición de la lectura y la escritura; así obtienen resultados superiores a los de un grupo de control que recibe un entrenamiento cuantitativamente equivalente pero sin relación con la fonología.

De acuerdo con los resultados anteriores, los métodos fónicos tienen una ventaja respecto a los métodos de enfoque global, en la medida en que empiezan temprano a explicitar el código alfabético, aportándole al aprendiz una forma autónoma de leer todas las palabras que encuentre. Es evidente, sin embargo, que la comprensión del código alfabético es necesaria pero no suficiente para lograr un procesador de palabras automatizado. La automatización del reconocimiento de palabras escritas requiere una práctica prolongada de la lectura; los trabajos experimentales muestran que es la propia actividad de leer la que permite alcanzar este resultado. Así, el hecho de identificar una palabra en el curso de la lectura tiene un doble efecto. Por un lado, automatiza el proceso de ensamblaje fonológico y, por otro, crea poco a poco las representaciones ortográficas de las palabras leídas, es decir, encontradas e identificadas. Estas representaciones ortográficas son las que permitirán la identificación directa de tales palabras en encuentros ulteriores. Este es el fundamento de la noción de "autoaprendizaje", un mecanismo que explica cómo el aprendiz de lector, en la medida en que disponga de los mecanismos fonológicos de base que le permitan identificar palabras escritas, podrá por sí solo mejorar el funcionamiento de su procesador de palabras.

Pero esta evolución es larga, y así uno de los autores, Emilio Sánchez, con sus colaboradores, ha mostrado en un reciente estudio que la habilidad de los niños para leer palabras aisladas (rapidez y exactitud) al cabo de seis años de escolaridad presenta aún diferencias individuales importantes. Tales diferencias guardan una fuerte correlación con la comprensión de textos propios de ese nivel escolar; la relación se mantiene aunque se elimine la influencia de otras variables que también intervienen en la comprensión de los textos, tales como los conocimientos previos sobre el tema, la memoria de trabajo y la capacidad para operar con marcadores discursivos. Estos resultados demuestran que la eficacia del procesador de palabras no es aún perfecta en algunos alumnos al cabo de seis años de práctica y que el nivel de eficacia alcanzado determina, en gran medida, la habilidad de comprensión de textos del aprendiz.

Un argumento complementario en favor de la utilización temprana del código alfabético es el llamado efecto "San Mateo", con el que K. Stanovich explica que las diferencias individuales al principio del aprendizaje de la lectura se acentúan, en vez de reducirse, con la escolaridad. Como en la parábola bíblica de los talentos, los buenos lectores progresan más rápido que los malos simplemente porque leen más. De esta forma, los aprendices a los que se les facilita la adquisición del código alfabético se convierten pronto en lectores autónomos, y esta ventaja, que les permite leer mejor ya desde el inicio, constituye una poderosa motivación para leer más. Los progresos así alcanzados les van distanciando cada vez más de los aprendices que no han recibido la ayuda necesaria para dominar el código alfabético.

Dificultades para aprender a leer

La relación estrecha entre conciencia fonológica y lectura se refleja en que la primera constituye el mejor predictor que se conoce del éxito en la segunda. Además, disponemos de abundantes datos empíricos que demuestran que algunos niños inteligentes, capaces de realizar aprendizajes complejos, de aritmética por ejemplo, tienen dificultades serias para aprender a leer, lo que demuestra que la inteligencia no constituye una garantía de éxito en el aprendizaje de la lectura. Estos datos sugieren que aprender a leer es algo particular, que requiere capacidades específicas innecesarias para otros aprendizajes; además, todo parece indicar que estas capacidades son de naturaleza fonológica.



4. EN EL METODO FONICO se enseña directamente a asociar letras y sonidos. Múltiples estudios parecen demostrar que, incluso en inglés, éste es un paso necesario.

TINA WEST

La definición clásica de la dislexia considera esta deficiencia como una dificultad específica del procesamiento de la lengua escrita, es decir, que ocurre en ausencia de problemas con la lengua oral. Esta noción era compatible, en principio, con la idea de que los disléxicos encontrarían problemas en la adquisición de la conciencia fonológica, pero no tendrían problemas fonológicos de base que dificulten la percepción y producción del habla. Hoy se acumulan datos convergentes que muestran que los disléxicos también tienen deficiencias fonológicas sutiles en el procesamiento del habla, si bien estas deficiencias sólo aparecen en condiciones experimentales particulares más exigentes que las naturales de audición. También es deficiente en los disléxicos la memoria de trabajo basada en la fonología, que permite integrar las palabras en frases. Esta deficiencia se manifiesta más a las claras en el procesamiento de la lengua escrita que en el del habla, porque la primera representa una carga de memoria superior a la segunda, especialmente cuando los procesos de identificación de las palabras escritas no han sido automatizados, como es el caso de los disléxicos.

Respaldan la explicación de la dislexia en cuanto deficiencia fonológica general (y no exclusivamente ligada a la lectura) algunas tareas concebidas para evaluar la accesibilidad de las representaciones fonológicas del habla. Se ha demostrado, por ejemplo, que los disléxicos son más lentos que los lectores normales en tareas consistentes en nombrar imágenes, así como en tareas de fluidez verbal en las que se les pide que digan tantos nombres como puedan, pertenecientes a un campo semántico determinado (por ejemplo, nombres de animales), en un tiempo limitado.

De conformidad con esta concepción de la dislexia, se ha podido demostrar asimismo que entrenar la conciencia fonológica de los niños que presentan dificultades de aprendizaje de la lectura produce beneficios apreciables.

Las dificultades de los disléxicos relativas a la conciencia fonológica y, consecuentemente, a la lectura serían el resultado de esta deficiencia fonológica más básica cuya existencia puede observarse independientemente de la actividad lectora. Así, en una sociedad sin escritura se podría ser "disléxico" sin saberlo.

Aprender a leer en español

Buena parte de los resultados examinados hasta ahora se han obtenido con el inglés, por lo que cabe preguntarnos si pueden ser trasladados, sin más, a otras lenguas y en particular al castellano, cuya escritura refleja de manera más fiel la fonología.

Los sistemas de escritura con ortografía alfabética pueden clasificarse en *superficiales* y *profundos*, según respeten en mayor o menor grado la consistencia de las correspondencias entre grafemas y fonemas, esto es, que a cada fonema le corresponda un único y específico grafema. Entre los primeros, también denominados transparentes, se encuentran el español, el alemán y unas cuantas lenguas más que poseen sistemas fonológicamente consistentes. Los sistemas profundos u opacos presentan en mayor o menor medida irregularidades en las correspondencias fonológicas debido en parte a que también representan unidades morfológicas; es el caso del inglés y el francés, por ejemplo. Así, en inglés, el pasado de los verbos regulares se escribe agregando "ed" al infinitivo (to walk [caminar] - walked [caminaba]), pero esta terminación puede pronunciarse de tres formas diferentes: /t/, /d/ e /id/, lo que crea una irregularidad en la traducción fonológica al mantenerse la terminación ortográfica fiel a la morfología verbal. Cuando la fonología y la morfología están en contradicción, como en este caso, el inglés tiende a sacrificar la primera en beneficio de la segunda. Así por ejemplo la "a" de "nature" se pronuncia /ei/ mientras que la misma letra en "natural" se pronuncia /æ/. Esta falta de regularidad en el plano fonológico (la misma letra representando fonemas diferentes) preserva el parentesco morfológico entre las palabras "nature" y "natural". En español, por el contrario, nos tomamos bastantes más libertades con la morfología para preservar la fonología (por ejemplo el mismo radical lo escribimos con "g" en "proteger" y con "j" en "protejo", con "z" en "caza" y con "c" en "cacería").

Además, una diferencia notable entre la fonología del inglés y la del español, que tiene consecuen-

cias importantes en el nivel ortográfico, es la distinta riqueza de los sistemas vocálicos de estas lenguas. El inglés tiene más de una decena de fonemas vocálicos y sólo utiliza las letras “a, e, i, o, u” clásicamente destinadas a la representación de vocales. Ello hace que estas letras, solas o combinadas, tengan que cumplir funciones múltiples y, como resultado, que se produzcan inconsistencias. Por el contrario, el español sólo posee cinco fonemas vocálicos y esto le permite establecer una relación biunívoca entre fonemas y letras (a excepción del grafema “y”, con el que a veces se representa al fonema /i/).

Es interesante agregar que esta situación tiene incidencia en la enseñanza del código alfabético, dado que las vocales se prestan mejor que las consonantes para adquirir conciencia fonémica. El motivo es que las primeras tienen una duración mayor y pueden pronunciarse aisladamente (se le puede explicar al aprendiz que /pan/ tiene una /aaaaa/ pero será difícil que entienda que también tiene una /p/, imposible de pronunciar si no es agregando una vocal o de manera distorsionada). Así pues, el establecimiento de la relación entre los fonemas y las letras correspondientes se ve facilitado si se comienza por las vocales, y se puede esperar que este primer paso ayude al niño a la hora de generalizar el código a las consonantes. La situación es poco favorable en inglés porque, si bien las vocales pueden ser aisladas como en español, la relación bastante más compleja que existe entre ellas y las letras que las representan hace que el potencial didáctico de las vocales desaparezca. Por otra parte, aunque la ortografía del inglés sea bastante más coherente en lo que respecta a las consonantes, no puede eludirse el problema de que cuesta más aislar éstas.

La conclusión de este análisis es que la adquisición del código alfabético tiene que ser más fácil en español que en inglés porque en español es más consistente. Ahora bien, si el código alfabético ha demostrado su eficiencia en inglés a pesar de su relativa falta de productividad, se puede esperar, en consecuencia, que en sistemas superficiales o transparentes como en el español este código sea “a fortiori” más eficiente.

En esta línea, los trabajos comparativos entre sistemas ortográficos diferentes indican que la adquisición de la lectura es más rápida en un sistema transparente. Por ejemplo, H. Wimmer y U. Goswami han demostrado que la lectura de los nombres de los números en inglés (una lista como three, two, eight, etc.) es lenta y aún plantea problemas a escolares de tercer año. En alemán (sistema transparente), por el contrario, esta habilidad está bien establecida a fines del primer año de escuela, es decir, más de dos años antes que en inglés. La diferencia entre los dos sistemas es debida a la distinta complejidad del código y no, por ejemplo, a problemas de pronunciación que influyeran en los resultados. Para controlar este y, eventualmente, otros factores no pertinentes los niños que participaron en el experimento tenían que “leer” también las cifras correspondientes (3, 2, 8, etc.), lo que ponía a anglófonos y germanófonos en las mismas condiciones. Esta situación experimental no dio lugar a diferencias entre lenguas; se muestra así que la rapidez de aprendizaje está ligada a la mayor o menor transparencia del código fonológico.

Nuestros propios trabajos, comparando la rapidez de la adquisición de la ortografía léxica en francés (sistema profundo) y en español, confirman lo observado en la lectura. Dichos trabajos tienen en cuenta el hecho de que la ortografía del español, a pesar de su carácter globalmente transparente, tiene un número relativamente importante de incoherencias que causan dificultades en la escritura. Por ejemplo, las sílabas /xe/-/xi/ se pueden escribir con “g” o con “j”; la “h” inicial es muda y por consiguiente no puede ser deducida de la fonología. Estas incoherencias son estrictamente idénticas en las dos lenguas comparadas: escribir “colegio”, y “habitación” en español y “collège” o “habitation” en francés depende de la posesión de una representación memorizada de estas palabras en el léxico ortográfico, lo que a su vez está en función de la frecuencia con la que aquellas palabras hayan sido encontradas en los textos leídos por los niños. Los resultados muestran que muchas de estas palabras ya son familiares, y por tanto escritas correctamente por los aprendices, al cabo de pocos meses de escolaridad con métodos fónicos en español, y que hay que esperar más de un año para observarlo en francés. Tal resultado es en cierto modo paradójico, si se piensa que el código fonológico es considerablemente más eficiente en español que en francés, lo que podría llevar al lector hispanohablante a basarse exclusivamente en el código y no darle importancia a la escritura lexical, cuantitativamente menos importante que en francés. Parece, por tanto, que el léxico ortográfico se desarrolla más rápido en español que en francés y la ventaja de los hispanohablantes, comparados con los francófonos, proviene probablemente de que los primeros aprenden a leer más pronto que los segundos y los niños que leen antes pueden leer más y el mecanismo de autoaprendizaje desarrolla la lectura y la ortografía lexical con más rapidez.

La conclusión de los trabajos comparativos indica que disponer rápidamente de un código fonológico eficaz desempeña un papel positivo en el proceso de aprendizaje de la lectura y la escritura. Ahora bien, los trabajos realizados para comparar métodos de enseñanza de la lectura en inglés concluyen que enseñar el código fonológico favorece el aprendizaje a pesar de que el código no sea muy productivo. Parece poco razonable pensar que enseñar el código fonológico en sistemas ortográficos como el del español o el alemán, en los cuales es sumamente eficiente, pueda tener un efecto negativo. Por el contrario, el razonamiento basado en la idea de autoaprendizaje (a leer se aprende leyendo) sugiere que cuanto antes el niño sea capaz de leer de manera autónoma tendrá mayor ventaja, y que proporcionarle la clave del código, sobre todo cuando éste es eficaz, va a contribuir a hacer de él un lector autónomo y así su propio profesor. Si se puede entender que los pedagogos de la lectura en inglés

se hayan planteado el problema de decidir cuándo exponer al niño a un sistema de reglas complejo y poco productivo, parece más difícil entender que las lenguas que poseen un sistema transparente no se aprovechen de su fortuna.



5. LAS ACTIVIDADES que facilitan al aprendiz el establecimiento de correspondencias entre partes de las palabras habladas (sílabas y fonemas) y partes de las palabras escritas (unidades ortográficas de tamaño silábico y grafemas simples), son fundamentales para el aprendizaje del código alfabético.

JESUS ALEGRIA, MARISOL CARRILLO Y EMILIO SANCHEZ

Una dosificación armónica

Una dosificación armónica de ingredientes de origen comunicativo y de origen fónico nos parece indispensable para afrontar el programa gigantesco de enseñar a leer a todos los niños. Ningún método excluyente puede pretender cubrir la totalidad del proyecto. Cada una de las familias de métodos se centra en aspectos específicos e importantes. La seducción que ejerce el lenguaje integrado en el medio educativo es comprensible y legítima. Corresponde a una filosofía de la enseñanza en la cual se le da al aprendiz un papel activo y al maestro una sensibilidad aguda a los signos que indican dónde se sitúa exactamente el alumno.

Es a veces difícil entender la obstinación de algunos defensores del lenguaje integrado contra la fonología. La fonología es un aspecto de la lengua, como la sintaxis y la semántica, y como tal, forma parte de las adquisiciones que el niño tiene que realizar para elaborar una concepción adecuada de lo escrito. Hay que señalar que la fonología es el elemento específico fundamental de la lengua escrita, puesto que está fabricada con letras que representan los fonemas. La asimilación progresiva de lo escrito, a la que el niño se entrega en un contexto educativo constructivista, va a llevarlo a plantearse qué representan las letras y ahí el profesor sensible que lo acompaña va a tener que ayudarlo a comprender el código alfabético, una de las realizaciones magnas de la civilización. Se puede adivinar que la aversión que ejerce la fonología en algunos medios educativos proviene de fantasmas como el de imaginar al profesor con sus alumnos cantando un lunes por la mañana: "la le li lo lu, na ne ni no nu, ta te ti...". Los trabajos sobre la toma de conciencia de la estructura fonológica de la lengua no tienen gran cosa que ver con estas canciones.

Para concluir, un punto nos parece esencial. La comprensión del código alfabético es indispensable al comienzo del aprendizaje y el niño tiene que ser ayudado en esta tarea. Ahora bien, la manera de ayudarlo puede tomar formas diversas y deja una libertad considerable al maestro que haya entendido por qué es indispensable su auxilio. Se podría incorporar la filosofía del lenguaje integrado sin ninguna dificultad conceptual. Bastaría con que los defensores extremos de este método tuvieran en cuenta las consolidadas conclusiones de los estudios experimentales (y abandonaran su militancia).

Un programa de enseñanza de la lectura debe llevar al niño al punto donde pueda dedicar todos sus recursos intelectuales a comprender el sentido del texto que está leyendo. Toda la escolaridad está destinada a que los alumnos lleguen a leer de manera inteligente. La armonía a la que aspiramos podría ser entendida con una metáfora musical: una técnica irreprochable al servicio de la musicalidad. Esta última es lo único que importa, pero es inalcanzable sin la primera.

Los autores

Jesús Alegría Iscoa, **Marisol Carrillo Gallego** y **Emilio Sánchez Miguel** investigan los procesos psicolingüísticos que intervienen en la adquisición de la lectura y explican las dificultades en este aprendizaje. Alegría es profesor de psicolingüística en el Laboratorio de Psicología Experimental de la Universidad Libre de Bruselas. Carrillo enseña psicología de la lectura en el departamento de Psicología Evolutiva y de la Educación de la Universidad de Murcia. Emilio Sánchez se halla adscrito al departamento de Psicología Evolutiva y de la Educación de la Universidad de Salamanca.

Bibliografía complementaria

POR UN ENFOQUE PSICOLINGÜÍSTICO DEL APRENDIZAJE DE LA LECTURA Y SUS DIFICULTADES. Jesús Alegría, en *Infancia y Aprendizaje*, n.º 29; 1985.

LENGUAJE INTEGRADO. Coordinado por Pablo del Río y Pilar Lacasa, en *Comunicación, Lenguaje y Educación*, n.º 25; 1995. Véase también la réplica (de Emilio Sánchez) y contra-réplica (de Pilar Lacasa) en *Cultura y Educación*, n.º 1; 1996.

PSICOLINGÜÍSTICA DEL ESPAÑOL. Compilación realizada por Manuel de Vega y Fernando Cuetos. Editorial Trotta, 1999.

ENSEÑAR A LEER. María Clemente. Editorial Pirámide, 2001.

La red cósmica

Las observaciones y las simulaciones del medio intergaláctico descubren las mayores estructuras del universo

Robert A. Simcoe

No existe el espacio vacío. Nada se acerca más al vacío que las desiertas extensiones entre las estrellas y las galaxias. Y sin embargo, incluso el más remoto paraje del universo está inundado de gas. De muy baja densidad, eso sí; y cuanto más lejos esté de las galaxias, más enrarecido se hallará. Cada centímetro cúbico de aire contiene unos 5×10^{19} átomos; el medio intergaláctico, 10^{-6}, como si cada átomo habitase en un cubo privado de un metro de lado. Pero no debe deducirse que entre las galaxias escasea la materia. El volumen del espacio que las separa es inmenso; la suma de la masa que encierra se agiganta en la misma escala. Puede que la masa atómica del gas intergaláctico sobrepase la masa atómica combinada de las estrellas y galaxias del universo en un 50 por ciento.

A medida que los cosmólogos van ofreciendo nuevas exposiciones de la evolución del universo desde sus comienzos —la gran explosión— hasta el momento actual, resulta cada vez más patente que, mientras no comprendamos la física de la materia intergaláctica, no sabremos cómo se formaron las galaxias, las estrellas y los planetas. Gracias a los rápidos avances de los telescopios y de la potencia de los ordenadores, hemos estudiado en los últimos diez años las profundidades del espacio intergaláctico con un detalle sin precedentes. Nuestro conocimiento del nacimiento y evolución de las grandes estructuras del universo ha ganado mucho con ello.

En el rojo

El gas intergaláctico es tan tenue y oscuro —por sí mismo, no produce luz—, que cabe preguntarse cómo se las ingenian los astrónomos para observarlo. La detección es indirecta; se basa en analizar su efecto en la luz procedente de las fuentes más lejanas. Las más comunes en este tipo de observaciones son los cuásares, un tipo particular de galaxia con un agujero negro de masa muy elevada en su centro. El gas que rodea al agujero emite una radiación intensa que, con frecuencia, llega a centuplicar, a veces con creces, el brillo de la propia galaxia. Puesto que los cuásares son tan luminosos, podemos observarlos a grandes distancias y medir los efectos del gas intergaláctico en su luz a lo largo del universo.

Recogemos los fotones procedentes de estos faros con los telescopios más poderosos, y los ordenamos en los espectros conforme a su longitud de onda (*véase la figura 4*). El rasgo más característico de los espectros es una línea de emisión, producida por los átomos de hidrógeno cerca del agujero negro del cuásar. Los electrones de estos átomos están excitados a un nivel cuántico más alto que su estado fundamental. Cuando regresan a éste, emiten fotones de una determinada longitud de onda, 121,56701 nanómetros; esa emisión recibe el nombre de "transición Lyman-α". Sin embargo, observamos la línea a una longitud de onda mucho mayor, a 560 nanómetros. Se debe a que el cuásar se aleja de nosotros como parte de la expansión del universo. La expansión hace que los objetos más distantes de nosotros se vayan alejando proporcionalmente más deprisa que los más cercanos. A medida que un objeto se aleja, la luz que emite se desplaza a mayores longitudes de onda; este fenómeno puede compararse el efecto Doppler, que baja el tono del pitido de un tren que se aleja. A ese aumento de la longitud de onda se le llama "corrimiento al rojo" porque los objetos cósmicos más lejanos aparecen siempre más rojos.

Pensemos ahora en qué le ocurre a la luz del cuásar cuando atraviesa el medio intergaláctico. A medida que avanza hacia la Tierra, algunos de sus fotones se encontrarán con átomos de hidrógeno por el camino. Aquellos que, tras haber recorrido el espacio en expansión entre el cuásar y los átomos, presenten una longitud de onda de 121,56701 nanómetros, serán absorbidos por los átomos, que pasarán a tener electrones en un estado excitado. Cuando los electrones regresen al estado fundamental emitirán nuevos fotones, pero en direcciones arbitrarias, que no tendrán por qué apuntar hacia la Tierra (*véase la figura 2*). Por lo tanto, la nube de átomos de hidrógeno absorbe la luz en una longitud de onda muy específica y la dispersa eficientemente. Este efecto se manifiesta como una "muesca" en el espectro.

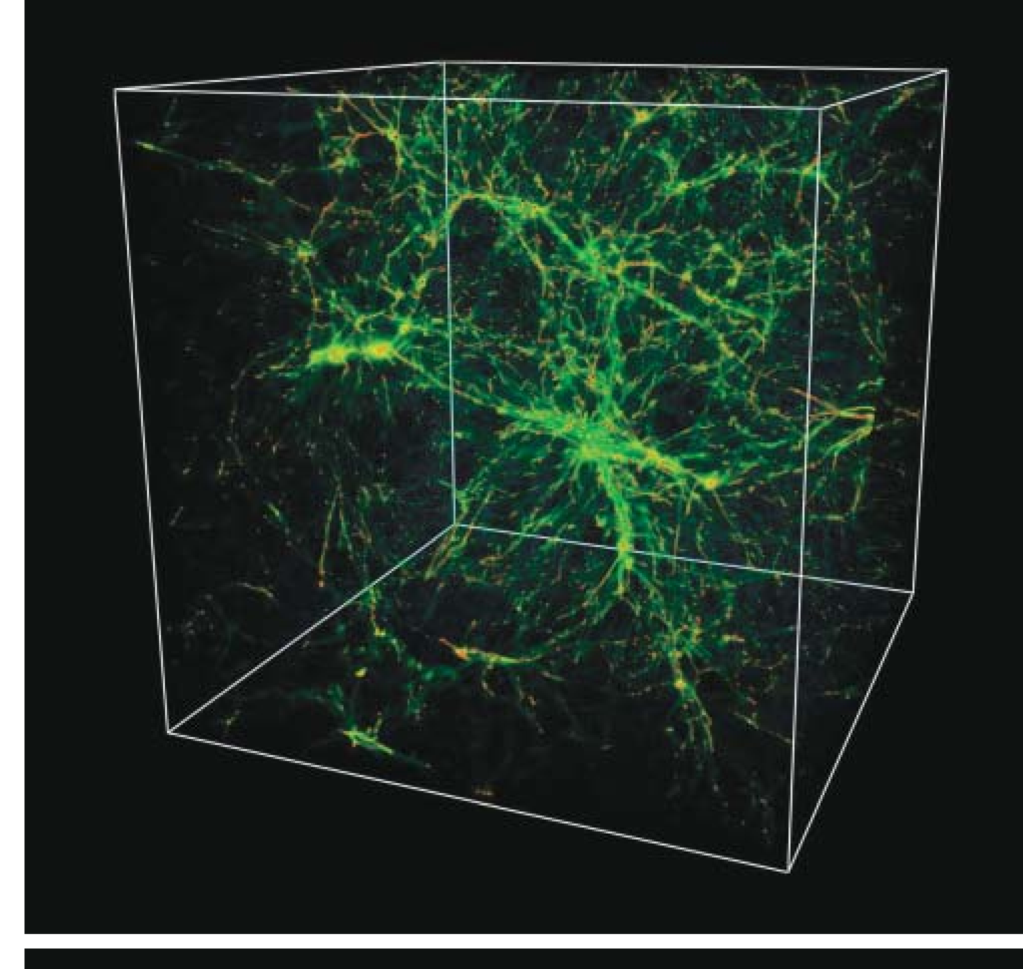
El medio intergaláctico contiene muchas nubes de hidrógeno situadas a diferentes distancias de nosotros. Y puesto que esas nubes tienen distintos desplazamientos al rojo, el espectro de un cuásar exhibe muchas líneas de absorción a diferentes longitudes de onda.

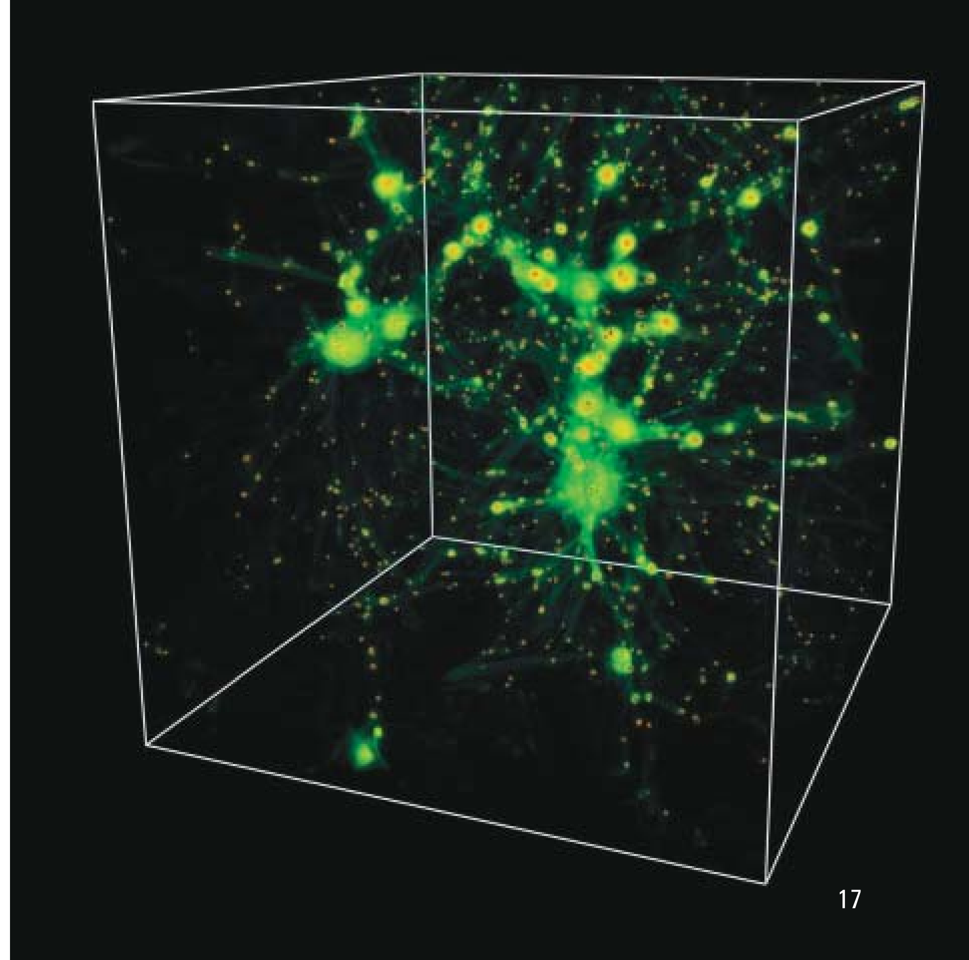
Las longitudes de onda menores que la de la línea de emisión parecerán "comidas", según sea la ubicación de cada nube entre el cuásar y nosotros. En los últimos años, gracias a los nuevos instrumentos de los grandes telescopios, hemos examinado los espectros de los cuásares con resoluciones muy finas y una intensidad de señal muy alta con respecto al nivel de ruido. Estos datos dividen el medio intergaláctico en distintas nubes individuales.

Una telaraña cósmica

Cuando se estudiaron por primera vez las líneas de absorción de los cuásares, no estaba del todo claro cómo interpretarlas, sobre todo porque se carecía de los datos de gran calidad que hoy tenemos. Entre finales del decenio de 1970 y principios del siguiente, el equipo de Wallace Sargent tomó una serie de medidas en el Observatorio de Monte Palomar que convencieron a la mayoría de que las líneas de absorción se debían a la materia intergaláctica. Sin embargo, había bastantes modelos teóricos compatibles con los datos disponibles; en su mayoría atribuían las líneas a cúmulos de nubes de gas sueltas, esféricas.

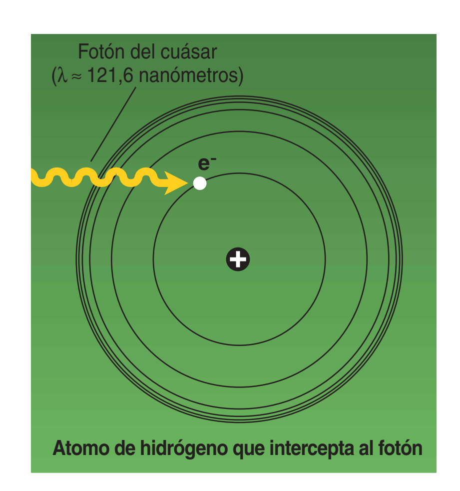
En los últimos años, a los avances en las técnicas de observación



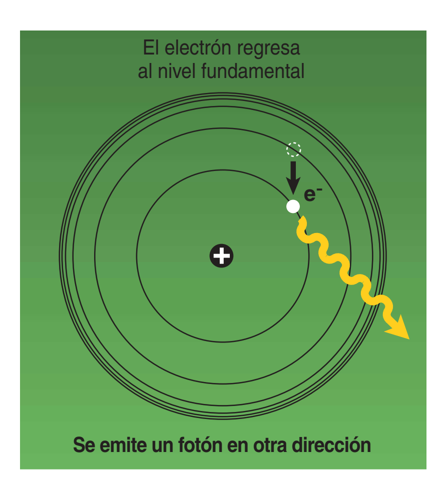


RENYUE CEN, UNIVERSIDAD DE PRINCETON/*American Scientist*

1. LAS SIMULACIONES NUMERICAS muestran la distribución del gas intergaláctico en los filamentos (*verde*) y vacíos (*negro*) de la red cósmica. Gracias a modelizaciones por ordenador y a las observaciones de los telescopios, sabemos que la red cósmica ha cambiado de aspecto: una madeja de hebras cuando el universo contaba con dos mil millones de años (*arriba*), hoy (*abajo*), transcurridos desde entonces casi doce mil millones de años, parece más grumosa. Ese cambio es el resultado natural de la atracción gravitatoria, que fue cebando cualquier pequeño aumento de densidad con más y más materia. La caja de la simulación de arriba tiene unos 30 millones de años-luz de lado; la de abajo es cuatro veces mayor (debido a doce mil millones de años de expansión cósmica). En las escalas de esta figura, la Vía Láctea aparecería como una mota, casi imperceptible, de apenas un milímetro de diámetro.



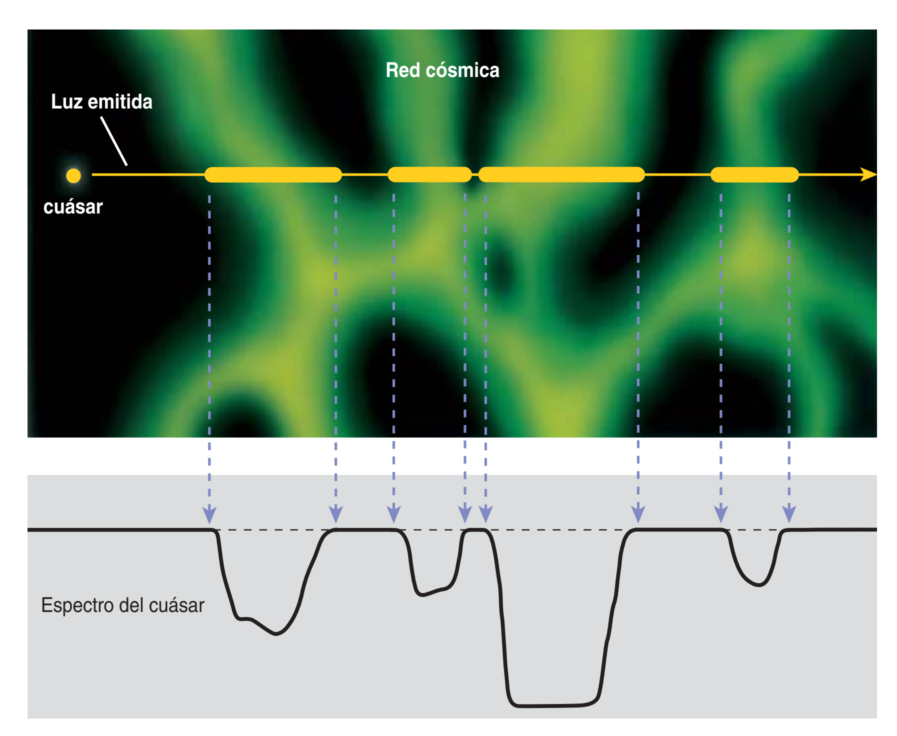




2. LOS ATOMOS DE HIDROGENO absorben y emiten fotones a la longitud de onda (λ) de 121,56701 nanómetros, correspondiente a la diferencia de energía entre el primer y segundo nivel electrónico (la transición Lyman-α). Cuando un átomo intercepta un fotón procedente de un cuásar lejano (*izquierda*), la energía que absorbe envía su único electrón a un nivel orbital más alto (*centro*). Cuando el electrón regresa al nivel fundamental (*derecha*), se emite un fotón, pero en una dirección aleatoria que no tiene por qué coincidir con la dirección de la Tierra. Esto explica que las nubes de gas hidrógeno del medio intergaláctico debiliten la luz de los cuásares lejanos, pese a que emiten tantos fotones cuantos absorben.

se ha sumado la creciente capacidad de los modelos computacionales. Su ejecución ha requerido numerosas colaboraciones entre grupos de astrónomos y meses de cálculo con superordenadores. Estas simulaciones informáticas diseñan una caja imaginaria que abarca un volumen representativo del universo. La dividen en una red de células tridimensionales y distribuyen por ella la materia. Ese estado inicial se atiene a las condiciones determinadas por las observaciones del universo temprano. Tras introducir en el modelo los procesos físicos que afectan a la evolución del medio intergaláctico, se ejecuta la simulación: la materia y la energía fluyen de célula a célula dentro de la caja, gobernadas sólo por las leyes físicas. El resultado final viene a ser una sucesión de planos fijos de ese fragmento de universo, cada uno de los cuales comprime varios millones de años de historia cósmica. El programa examina la distribución de materia en la caja plano a plano, es decir, tras cada intervalo de tiempo, y evalúa la fuerza total que se ejerce sobre cada partícula, para determinar hacia dónde se moverá en el siguiente paso. A intervalos regulares, el ordenador registra la densidad del gas en el medio intergaláctico y compara los resultados con las observaciones reales de los espectros de los cuásares. Así, comprueba la precisión de los modelos físicos.

Efectuaron una de estas simulaciones Jeremiah Ostriker y Renyue Cen, de la Universidad de Princeton. Uno de sus "planos" muestra el universo cuando tenía un 15 por ciento de su edad actual, es decir, unos dos mil millones de años. El rasgo más característico es la tendencia del gas a condensarse en una red de filamentos que se entrelazan a través de inmensos huecos de baja densidad. Todos los nuevos modelos sintéticos exhiben este tipo de estructura; se la ha bautizado con el nombre de red, o telaraña, cósmica.



3. LA RED COSMICA DE FILAMENTOS GASEOSOS (*arriba, verde*) del medio intergaláctico, al interrumpir la luz de un cuásar lejano antes de que alcance la Tierra, produce las líneas de absorción que se observan en el espectro del cuásar (*abajo*).

TOM DUNNE/*American Scientist*

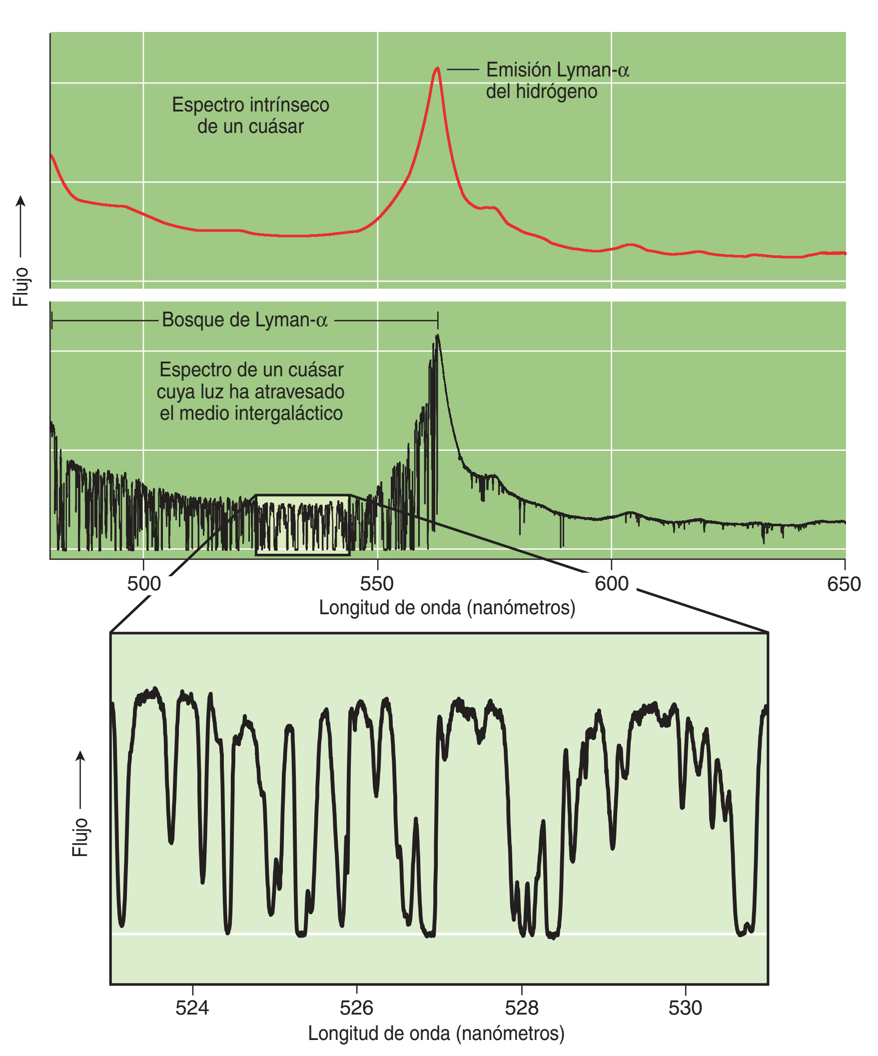
Para comparar esta predicción con las observaciones, se generan múltiples espectros artificiales de cuásares, trazando líneas aleatorias a través de la caja de la simulación. Mediante el cálculo de las variaciones de la densidad de gas a lo largo de una línea, se computa la cantidad de absorción que se debería observar en un espectro tomado en esa línea de visión. Tal proceder viene a ser como si un observador se encontrara en una cara de la caja y midiera el espectro de un cuásar sito en el lado opuesto.

Desde el punto de vista estadístico, los "espectros" de este universo artificial apenas si se distinguen de los espectros reales de los cuásares. Los modelos predicen con exactitud el número de líneas de absorción, la distribución de sus intensidades y anchuras, y su evolución con el tiempo. En lo básico, los modelos confirman los procesos físicos que dominan la evolución del universo a gran escala.

Concentraciones

La técnica nos ha facilitado los medios necesarios para observar los parajes recónditos del medio intergaláctico e interpretar esas observaciones en el contexto de un modelo cosmológico. Una vez que hemos descrito los métodos, demos ahora un paso atrás y examinemos el modelo en sí. Narremos la formación de las galaxias y la estructura intergaláctica.

La historia empieza hace más de 13.000 millones de años, unos 380.000 años después de la gran explosión; aquel universo divergía mucho del nuestro. No había ni estrellas, ni galaxias, ni redes, sólo una sopa uniforme de protones y electrones libres. La distribución del gas era tan homogénea, que sus picos de densidad diferían en apenas una parte en cien mil del promedio cósmico. Pero llegó un momento en que la sopa evolucionó hacia un estado muy grumoso, donde tiras "densas" de galaxias y gas surcaban las vastas extensiones de espacio. Hoy día, el rango de densidades es muchísimo mayor: 32 órdenes de magnitud van de la densidad atómica del interior del Sol a la del espacio intergaláctico.



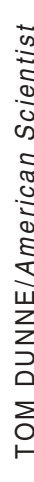
4. EL ESPECTRO INTRINSECO de un cuásar (*arriba*) exhibe la cantidad de luz que emitió a diferentes longitudes de onda. Produjeron el pico central los átomos de hidrógeno, con su emisión de fotones de una longitud de onda de 121,56701 nanómetros. Recibe el nombre de línea de emisión de Lyman-α. Aquí aparece en 560 nanómetros porque la expansión del universo desplaza la luz a mayores longitudes de onda, desde el ultravioleta hacia el rojo. A medida que la luz del cuásar atraviesa el medio intergaláctico, éste va mordiendo el espectro (*centro, "bosque" de rayas a la izquierda del pico*), porque las nubes de hidrógeno interpuestas absorben la luz localmente a la longitud de onda de 121,56701 nanómetros; pero como estas absorciones ocurren a diferentes distancias de la Tierra, se genera el "bosque de Lyman-α". Algunos elementos pesados también absorben fotones a mayores longitudes de onda, añadiendo las pocas líneas de absorción que se observan a la derecha del pico. En los últimos años, los espectros de alta resolución (*abajo*) han permitido estudiar nube a nube el medio intergaláctico.

TOM DUNNE/*American Scientist*

Se cree que esta transición de lo homogéneo a lo grumoso se debió a la gravedad. Imaginemos una caja con una distribución uniforme de materia tal, que la densidad de las partículas sea constante. Supongamos que, en un punto de la caja, las partículas se agitan por alguna razón y se produce un ligero aumento de densidad. Esta nueva concentración de materia ejercerá una fuerza gravitatoria que atraerá hacia sí las partículas colindantes. La materia precipitada aumentará la masa del grumo, lo que a su vez incrementará su atracción gravitatoria, caerá más materia y así sucesivamente. Con tiempo suficiente, el pequeño incremento de densidad original se transformará en un denso

Materia oscura
Materia común
Gran explosión
380.000 años: la combinación de protones y electrones crea el hidrógeno
Galaxias
Gas neutro
Gas ionizado
Elementos pesados
Materia oscura
Materia común
Edades oscuras
¿Las primeras estrellas?
Constitución de galaxias (retroalimentación química)
Gran explosión
1
2
3
4
13,7 (hoy)
Miles de millones de años

5. LA EVOLUCION DEL MEDIO INTERGALACTICO comenzó inmediatamente después de la gran explosión, mientras la densidad de la materia común —protones, electrones y fotones— oscilaba bajo las influencias contrapuestas de la gravedad y la presión. Al mismo tiempo, la materia oscura ensamblaba en silencio una primitiva red cósmica. Transcurridos 380.000 años desde la gran explosión, los protones y los electrones se combinaron para formar gas de hidrógeno neutro (*azul*), enseguida atraído por la gravedad hacia el ya existente entramado de materia oscura. El gas y la materia oscura continuaron su proceso de ensambladura en la fría oscuridad hasta que nacieron las primeras estrellas en las regiones más densas de la red cósmica. La luz de estas estrellas reionizó el medio y calentó el universo, muy probablemente durante los primeros mil millones de años (*rosa*). A medida que las galaxias tomaban forma, la producción estelar continua de elementos pesados empezó a "contaminar" el medio intergaláctico (*verde*).



grumo que contendrá la mayor parte de la masa que antes se repartía por todo el volumen.

En este simple fenómeno se fundamenta toda teoría que intente explicar la estructura a gran escala del universo. No obstante, para que ese fenómeno interviniera, el universo debió contar, ya en un momento anterior, con un entramado de fluctuaciones de la densidad primordiales, que luego se condensarían y crearían las estructuras que tenemos hoy día. Estas perturbaciones se manifiestan por medio de pequeñas variaciones en la distribución de temperatura de los fotones que, con longitudes de onda del intervalo de las microondas, nos llegan de las distintas regiones del cielo. La caracterización de ese fondo de microondas es, hoy por hoy, uno de los asuntos más importantes de la investigación astrofísica, ya que sus pequeñas perturbaciones representan las antiguas semillas gravitatorias de la estructura cósmica.

Parecería que disponemos de todas las piezas necesarias para entender el origen de la red cósmica. Hemos observado las variaciones de densidad en el universo inicial y tenemos un modelo potente que explica la evolución de estas perturbaciones hasta convertirse en estructuras de mayor escala. Sin embargo, hay un problema. Las variaciones primordiales eran tan pequeñas, que 13.700 millones de años no bastan para que crecieran hasta crear las ensambladuras actuales. Este dilema recibió gran atención durante los años setenta, quizás alimentado por la política de la Guerra Fría. Entraron en liza dos teorías para explicar la formación de las estructuras, una concebida por Yakov Zel'dovich, de la Escuela Rusa de Astrofísica de Moscú, y otra por James Peebles y su grupo,

de la Universidad de Princeton. Los debates posteriores pusieron de manifiesto la fragilidad de ambas teorías. La solución exigía un nuevo ingrediente en los modelos cosmológicos, al que se denominó “materia oscura”. Es uno de los grandes descubrimientos de la cosmología moderna.

Materia obscura

Esta materia oscura difiere de la materia común de la que están hechas las estrellas, los planetas y las personas. No sólo no brilla, sino que interacciona con “nuestra” clase de materia sólo mediante la fuerza de gravedad. Se cree que está formada por partículas exóticas, que no ejercen ningún otro efecto en los átomos y moléculas comunes. Es más, la materia oscura parece más abundante, en un factor cuatro a uno, que la materia normal a lo largo de todo el universo. En razón de su extrañeza, encontró oposición cuando la propuso Fritz Zwicky, en los años treinta. Sin embargo, ante las pruebas abrumadoras ha acabado por aceptarse su existencia. Aunque no entendemos bien qué es la materia oscura, sí sabemos qué hace: mantiene unidas a las galaxias, curva la luz, frena la expansión del universo y dirige la formación de la estructura intergaláctica.

En relación a este último punto, volvamos a la niñez del universo. Durante los primeros 380.000 años, el calor residual de la gran explosión mantuvo caliente el universo (más de 3000 kelvin); por eso mismo, los electrones y protones de la sopa primordial no podían combinarse para formar átomos de hidrógeno neutro. Este tipo de gas ionizado, formado por electrones disociados y protones, se denomina plasma. Cuando las partículas del plasma están libres, intercambian energía y momento con la luz. En los primeros tiempos del universo, esa dispersión aumentó dentro de la sopa cósmica la presión del gas. Por lo tanto, cuando la gravedad intentaba comprimir las primeras perturbaciones de densidad, la presión gaseosa contrarrestaba su efecto, al igual que un globo cuando se lo estruja. Mientras los electrones y los protones permanecieron separados, el gas no pudo formar estructuras mayores. Las estructuras potenciales oscilaban a medida que la fuerza atractiva de la gravedad luchaba contra la presión expansiva del gas.

Pero cuando el universo alcanzó la edad de 380.000 años, ocurrió algo decisivo. En ese momento, la temperatura del universo, que se iba enfriando al expandirse, permitió que los electrones y los protones se combinasen y crearan átomos de hidrógeno. Estos y los fotones se desacoplaron de repente —la interacción de las partículas materiales y de la luz dejó de ser tan intensa—; por consiguiente, se redujo mucho la presión que había estado contrarrestando la gravedad. Con la gravedad libre para actuar sobre los átomos recién formados, la constitución de estructuras empezó a buen ritmo.

¿Qué papel desempeñó ahí la materia oscura? Iba escribiendo su propia historia, paralela a la de los protones, electrones y fotones sometidos a las influencias de la gra-

vedad y la presión. Puesto que la materia oscura interaccionaba con la materia común mediante la gravedad, la presión que impedía que el gas normal colapsara no actuaba sobre ella. Las partículas de la materia oscura configuraron sus macroestructuras mucho antes de que el gas normal comenzara a organizarse. Cuando la materia común se desacopló de los fotones, la oscura ya había constituido una telaraña primitiva. Tan pronto como la materia normal perdió el sostén de la presión fotónica, la gravedad de las estructuras de materia oscura preexistentes la atrajo hacia la telaraña. En este sentido, la materia oscura le dejó marcado un camino gravitatorio a la materia ordinaria.

Una vez en marcha el proceso, quedó asentada la infraestructura gravitatoria del medio intergaláctico. La caída libre de las materias oscura y común hacia concentraciones de masa cada vez mayores proseguía hasta que la creciente presión del gas frenaba la caída. El entramado de la red cósmica tomó su forma, pero aún no había empezado la generación de estrellas y el gas del universo se hallaba en estado eléctricamente neutro. El universo había entrado en una fase en que la materia vagaba por la oscuridad y se ensamblaba lentamente bajo la influencia gravitatoria. Continuó así hasta un determinado punto —entre los 200 millones y los mil millones de años después de la gran explosión—, hasta que un suceso alteró de raíz la naturaleza del medio intergaláctico y del universo en cuanto tal: nacieron las primeras estrellas.

Hágase la luz

Resulta desconcertante, a primera vista, que las estrellas, tan pequeñas, repercutieran en el devenir de un universo a escalas intergalácticas. Sólo tienen un diámetro de unos pocos segundos-luz, mientras que los filamentos de la red cósmica se extienden a lo largo de miles de millones de años-luz. ¿Cómo es posible que un objeto tan diminuto afecte a volúmenes tan inmensos? La respuesta se encuentra en el funcionamiento de las estrellas, los lugares donde se hallan y lo que ocurre cuando desaparecen.

Antes de que hubiera estrellas, la materia común del universo constaba de hidrógeno y helio. Se llama gas primordial a esta mezcla porque refleja la composición química original del cosmos, justo después de la gran explosión. Desde entonces, casi todo átomo de cualquier otro elemento —desde el argón hasta el cinc— se ha forjado en el interior de las estrellas, reactores nucleares muy eficientes: la gravedad comprime el gas a densidades tan altas, que los núcleos de los átomos chocan entre sí y se convierten en elementos más pesados. Esta nucleosíntesis estelar libera grandes cantidades de energía; es la fuente de la luz de las estrellas.

La nucleosíntesis tuvo varios efectos importantes en el medio intergaláctico. Primero, generó la luz estelar, que escapó hacia el espacio intergaláctico e interaccionó con los átomos neutros. Después, fuertes vientos galácticos —poderosos efluvios de gas caliente— arrojaron al medio intergaláctico los nuevos elementos, que "contaminaron" vastas regiones del universo.

Consideremos estos procesos en más detalle y regresemos a la red cósmica. Puesto que las galaxias son unas diez mil veces más densas que el promedio cósmico, esperaríamos encontrar sistemas semejantes a la Vía Láctea dentro de las regiones más densas de la red, donde se hallan los materiales básicos (las reservas de gas) necesarios para la formación de estrellas y galaxias.

En las simulaciones, las regiones más densas se sitúan en los filamentos de la red, sobre todo allí donde se cruzan varios. Por lo tanto, a escala cósmica, las galaxias deberían comportarse como partículas atrapadas en las hebras de la red; su distribución debería reproducir las estructuras delineadas por el gas intergaláctico. Los censos tridimensionales más recientes de galaxias, como el Estudio Digital Sloan de los Cielos y el Estudio de Desplazamiento al Rojo Galáctico 2dF, revelan que las galaxias se agrupan en filamentos. Sendos grupos de investigación dirigidos por Max Tegmark, de la Universidad de Pennsylvania, y Rupert Croft, de la Universidad Carnegie Mellon, han acometido la comparación de la estadística de los agrupamientos galácticos con la del gas intergaláctico, deducida de los espectros de los cuásares. Sus primeros resultados apuntan a que los mismos procesos físicos explican la constitución de

MATTHEW COLLESS; *Cortesía del equipo de la Exploración de Galaxias 2dF/American Scientist*

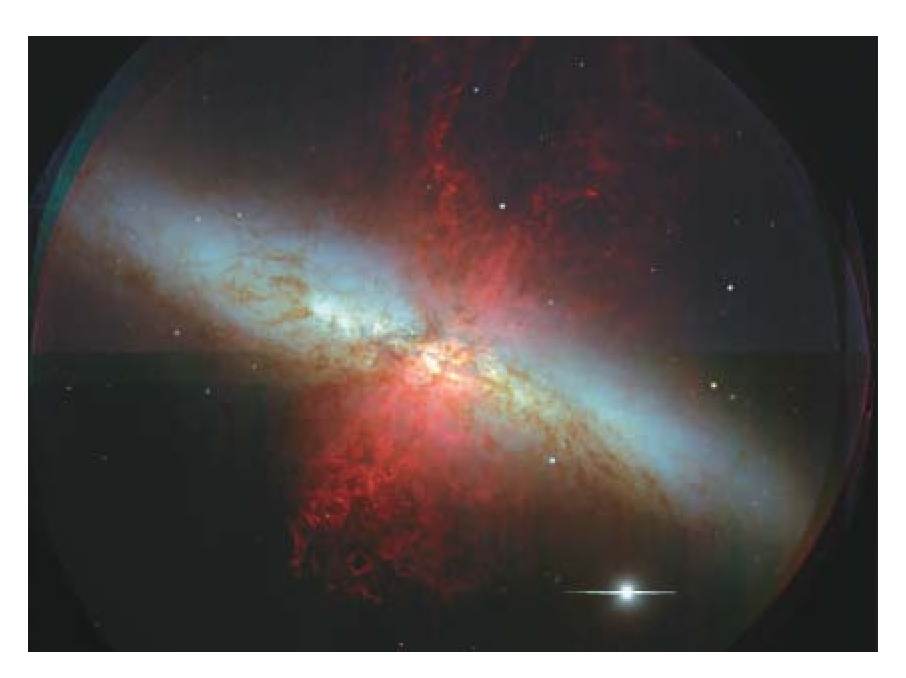
6. LAS EXPLORACIONES del universo cercano estudian la distribución de unas 75.000 galaxias (*puntos pequeños y azules*). El lugar que ocupa cada galaxia en la dirección radial es proporcional a su distancia a la Tierra (situada en la intersección de las dos cuñas). La posición angular (o ascensión recta en horas) corresponde a su localización a lo largo de una fina tira del cielo. Las galaxias trazan una clara red de estructuras filamentosas análoga a la red cósmica de las simulaciones numéricas.

la red de gas intergaláctico y de las macroestructuras galácticas.

A medida que las galaxias se condensaban en la red y empezaban a brillar, el universo se fue llenando de la primera luz tras la gran explosión: la era oscura había finalizado. Y las estrellas empezaron con diligencia a producir elementos pesados. Cuando se hubo formado un número notable de estrellas, la producción acumulativa de luz y productos químicos alteró la naturaleza del medio intergaláctico. La expresión "retroalimentación galáctica" designa el conjunto de estos efectos, porque las galaxias actúan sobre el medio que las creó. Aquí trataré sólo de dos tipos de retroalimentación: la radiación y la contaminación química.

El primer agente de la retroalimentación galáctica fue la luz estelar, que reionizó el medio intergaláctico. Recuérdese que la materia común empezó a construir grandes estructuras durante la era de la recombinación, cuando la unión de protones y electrones creó los átomos de hidrógeno. El gas del universo se mantuvo en un estado eléctricamente neutro durante algún tiempo. Las temperaturas, muy frías, apenas alcanzaban unas decenas de grados sobre el cero absoluto. Cuando los primeros fotones estelares escaparon de las galaxias, interaccionaron con los átomos de hidrógeno; les arrancaron electrones que habían permanecido ligados a esos átomos desde la recombinación. El gas se calentó hasta los 10.000 kelvin. Esa reionización ocurría en burbujas centradas alrededor de las incipientes galaxias; la luz de las estrellas no había tenido tiempo de internarse mucho en el espacio intergaláctico. Pero según iban encendiéndose más galaxias, las burbujas ionizadas crecieron hasta que las procedentes de galaxias vecinas llegaron a solaparse. Pronto, el volumen entero del universo volvió a estar ionizado otra vez (*véase la figura 5*).

Ahora creemos que el universo salió de su época oscura y se reionizó cuando apenas contaba con mil millones de años, menos de un 10 por ciento de su edad actual. Hoy día, sólo un átomo de hidrógeno de cada 10.000 se halla en estado neutro.



7. EL "VIENTO GALACTICO" procedente de la galaxia M82 expulsa enormes cantidades de material rico en elementos pesados (*rojo*) al medio intergaláctico. El centro de M82 está pasando por un período de intensa formación estelar (un "brote de formación de estrellas"). Las estrellas de mayor masa mueren a poco de nacer, en una sucesión de explosiones supernova que arroja materia fuera de la galaxia.

TETSUHARU FUSE; *Cortesía del Telescopio Subaru, Observatorio Astronómico Nacional de Japón/American Scientist*

La temperatura media del gas intergaláctico sigue siendo de unos 10.000 kelvin.

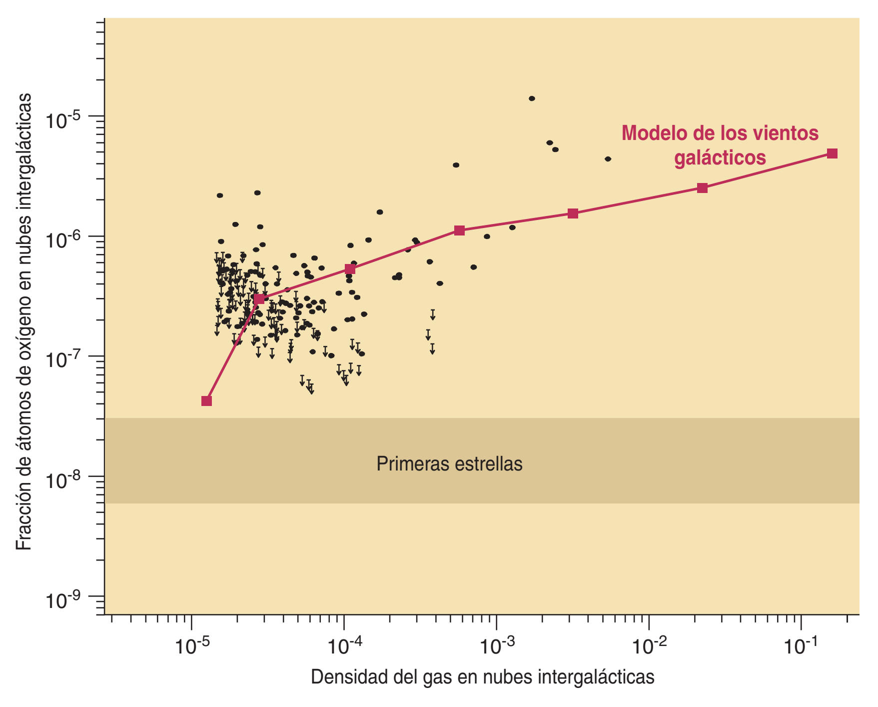
Poderoso viento

Durante mucho tiempo se ha creído que el medio intergaláctico era primigenio y que sólo se producían y repartían nuevos elementos dentro de las propias galaxias. Pero en los espectros de los cuásares se observaron débiles rayas de absorción, más hacia el extremo rojo del espectro que la línea de emisión del hidrógeno. Las generaban diferentes elementos —en el caso de la figura 2, carbono y silicio—, cuyas longitudes de onda características son más rojas que la línea de hidrógeno de 121,56701 nanómetros.

Las líneas de absorción de estos elementos pesados se observan en regiones que también contenían cantidades ingentes de hidrógeno, los halos gaseosos que rodeaban a las primeras galaxias, a cuyas estrellas, se suponía, se debía ese enriquecimiento químico. Sin embargo, a principios de los años noventa, los espectros de cuásares tomados por Lennox Cowie y Antoinette Songaila con los nuevos telescopios Keck mostraban elementos pesados en regiones muy alejadas de cualquier galaxia. Este descubrimiento indicó que la contaminación química del medio intergaláctico pudo haber sido mucho más eficiente de lo que se pensaba.

No obstante, la concentración de elementos pesados en el medio intergaláctico es muy baja: por ejemplo, sólo hay un átomo de carbono por cada millón de átomos (casi todos de hidrógeno). Es decir, una caja de espacio intergaláctico de 100 metros de lado contendría sólo un átomo de carbono. Aun así, esta pequeña cantidad demuestra que había una mezcla de elementos pesados por toda la red cósmica en la juventud del universo. ¿Cómo pudieron llegar hasta allí, tan lejos de las estrellas y las galaxias que los fabricaron?

Los indicios sugieren que los proyectaron violentos vientos galácticos. Estas corrientes de materia fluyen desde las galaxias en las que se están formando estrellas copiosamente. En todas las galaxias, las estrellas más pesadas despiden un brillo mayor y producen nuevos elementos. Queman tan deprisa, que consumen todo su combustible nuclear y no pueden continuar convir-



8. LA CONCENTRACION DE OXIGENO en las nubes intergalácticas señala que los elementos pesados se dispersaron a lo largo de la red cósmica, impulsados por los vientos galácticos, no por las primeras estrellas. La fracción de oxígeno es un trazador de la distribución de los elementos pesados. La densidad relativa del gas de las nubes varía casi exactamente con la inversa de la distancia entre éstas y la galaxia. Si las primeras estrellas hubieran sido los principales dispersores, el oxígeno habría tenido tiempo suficiente para mezclarse de manera homogénea por la red cósmica y mostraría una concentración baja y constante (*barra más oscura*). Las concentraciones de oxígeno (*puntos*) respaldan el modelo de los vientos galácticos, aunque en algunos casos (*flechas pequeñas*) sólo se pueden establecer límites superiores. Las distancias, determinadas por el desplazamiento al rojo, de las nubes observadas nos llevan al universo de hace 11.200 millones de años, cuando la densidad gaseosa media era unas 40 veces mayor que hoy día.

TOM DUNNE/*American Scientist*

tiendo elementos ligeros en elementos pesados. Cuando el reactor de una estrella de gran masa se apaga, la estrella acaba su vida en una explosión de supernova. La energía del estallido de una supernova típica es comparable a la detonación de 10^{31} bombas atómicas; los restos de la estrella moribunda, incluidas las nuevas sustancias generadas, salen lanzados al espacio.

Pese a su fuerza explosiva, una sola supernova no basta para contaminar el medio intergaláctico: el campo gravitatorio de la galaxia atrapa de nuevo los restos de la explosión antes de que puedan escapar. Sin embargo, las galaxias experimentan en ocasiones intensos brotes de formación de estrellas en los que éstas nacen y mueren entre 10 y 50 veces más deprisa de lo normal. En estos brotes de formación estelar se suceden velozmente las supernovas. La suma de su energía impulsa los restos hacia el exterior de la misma forma que un cohete se lanza en varias fases, hasta romper la barrera gravitatoria y expulsar los elementos pesados al medio intergaláctico. Se ha observado este fenómeno en algunas galaxias cercanas.

A pesar de que podemos estudiar con gran detalle los brotes cercanos y sus chorros de materia, estas galaxias son escasas en el universo local. La mayoría de las galaxias forman con discreción estrellas y retienen los elementos pesados que producen. Sin embargo, en el universo joven, la situación tuvo que ser diferente. Las observaciones de galaxias lejanas, realizadas por Max Pettini, de la Universidad de Cambridge, muestran que los chorros de gas eran muy frecuentes cuando el universo tenía un 15 por ciento de su edad actual. De ahí se siguen dos consecuencias importantes: casi todas las galaxias que vemos hoy han conocido un período de intensa formación estelar en el pasado; y grandes cantidades de elementos pesados se arrojaron al medio intergaláctico en una fase temprana de la historia del universo. Por lo tanto, ha habido tiempo suficiente para que este material haya recorrido grandes distancias y se haya mezclado con el gas intergaláctico primordial.

Los estudios de las galaxias primitivas y de su contribución al medio intergaláctico definen una frontera fundamental en nuestro conocimiento de las primeras estrellas y de las estructuras cósmicas. Quedan aún por responder numerosas preguntas. ¿Cuándo y cómo nacieron las primeras estrellas? Los elementos pesados, ¿han invadido el universo entero o todavía queda gas no contaminado procedente de la gran explosión? ¿Fueron las estrellas que reionizaron el medio las mismas que produjeron los elementos pesados intergalácticos?

Durante los últimos años he investigado algunas de estas cuestiones con Wallace Sargent, del Instituto Tecnológico de California, y Michael Rauch, de los Observatorios Carnegie. Hemos medido las concentraciones de elementos pesados en la red cósmica temprana con el fin de saber si hay rincones del universo libres de contaminación a los que todavía no hayan llegado los vientos galácticos. Por ahora hemos detectado elementos pesados en todas las hebras de la red cósmica, pero no está claro que la esfera de influencia de los vientos se extienda más allá de los filamentos, dentro de los vacíos intergalácticos. En estas regiones remotas, las densidades esperadas de elementos pesados son tan pequeñas, que ni siquiera las observaciones más sensibles resuelven las líneas de absorción. No obstante, nuestros resultados apuntan a que el contenido de los vientos galácticos se ha dispersado por el universo entero, antes de que el cosmos tuviera apenas un 20 por ciento de su edad actual.

También hemos comparado nuestras observaciones con distintos mo-

delos de formación estelar y producción química para determinar si las estrellas que reionizaron el universo fueron las mismas que contaminaron el medio intergaláctico. Nuestros resultados dan a entender que las primeras estrellas no contribuyeron significativamente al enriquecimiento químico del medio, sobre todo porque su momento de máximo auge fue muy corto. Creemos que la retroalimentación galáctica sucedió en diferentes oleadas. La primera generación de estrellas reionizó el universo; las generaciones posteriores lo han ido enriqueciendo poco a poco con metales.

Desde el punto de vista teórico, las simulaciones cósmicas más avanzadas incorporan ahora modelos realistas de los vientos galácticos y del enriquecimiento químico del universo. La física de la formación estelar y de los chorros de materia es tan compleja, que incluso los modelos numéricos más refinados tienen que recurrir a aproximaciones para que el problema sea abordable con métodos computacionales. Este campo progresa deprisa, de la mano del avance de la teoría y las observaciones.

Hay, sin embargo, muchos detalles que afinar. ¿Exactamente cuándo y cómo surgieron las primeras estrellas? ¿Cómo interaccionan las galaxias y el medio intergaláctico? Y, quizá sea lo más importante, ¿cuál es la naturaleza de la materia oscura? Cuando haya transcurrido el tiempo suficiente para tener una perspectiva histórica, los últimos diez años se recordarán por la creación de un modelo estándar del cosmos que reúne todo lo que sabemos de las galaxias y del medio intergaláctico.

El autor

Robert A. Simcoe tiene una beca Pappalardo en física del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Trabaja a menudo con los telescopios gemelos Magallanes de 6,5 metros, en el desierto chileno de Atacama.

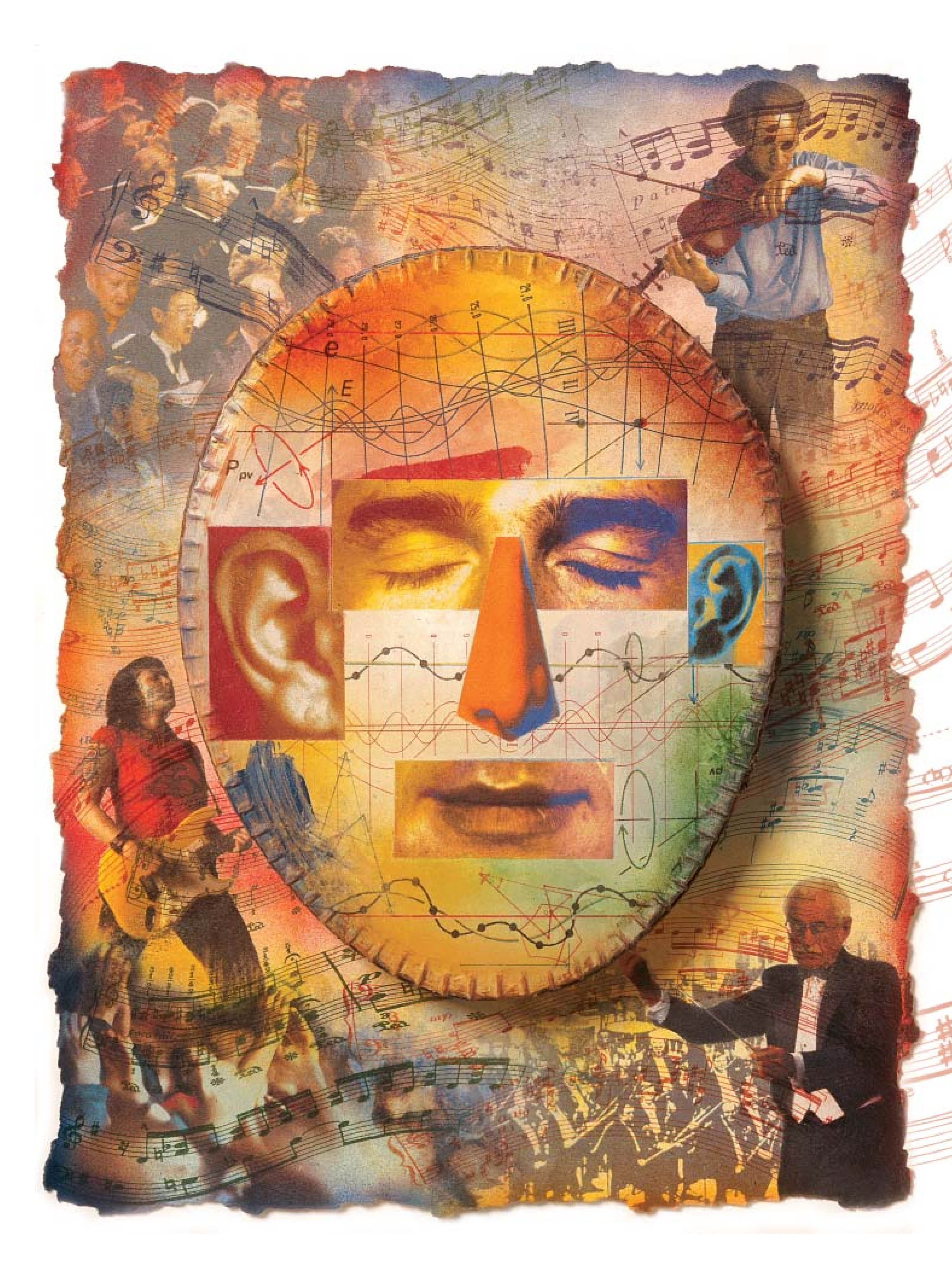
Bibliografía complementaria

THE LYMAN ALPHA FOREST IN THE SPECTRA OF QSOS. M. Rauch en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 36, págs. 267-316; 1998.

THE REST-FRAME OPTICAL SPECTRA OF LYMAN BREAK GALAXIES: STAR FORMATION, EXTINCTION, ABUNDANCES, AND KINEMATICS. M. Pettini et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 554; págs. 981-1000; 2001.

CHARACTERIZING THE WARM-HOT INTERGALACTIC MEDIUM AT HIGH REDSHIFT: A HIGH-RESOLUTION SURVEY FOR OVI AT REDSHIFT 2.5. R. A. Simcoe, W. L. W. Sargent, M. Rauch en *The Astrophysical Journal*, vol. 578, págs. 737-762; 2002.

THE DISTRIBUTION OF METALLICITY IN THE INTERGALACTIC MEDIUM AT REDSHIFT 2.5: OVI AND CIV THE SPECTRA OF 7 QSOS. R. A. Simcoe, W. L. W. Sargent, M. Rauch en *The Astrophysical Journal*. En prensa.



Música y cerebro

¿Dónde reside el secreto del poder singular de la música? En busca de una respuesta, se están reordenando los componentes del proceso desarrollado en el cerebro de intérpretes y melómanos

Norman M. Weinberger

Proveedora de sensaciones placenteras, la música endulza nuestras vidas. Un potente *crescendo* orquestal puede hacernos derramar lágrimas y provoca escalofríos. Cambios de intensidad en la banda sonora añaden carga emotiva a películas y programas de televisión. Los padres arrullan con nanas a sus bebés.

Este apego a la música tiene sus raíces en nuestro pasado remoto, en los albores de la cultura. Hace más de 30.000 años, el hombre tocaba ya flautas de hueso, instrumentos de percusión y birimbaos. Todas las sociedades cuentan con su propia música. De hecho, parece que la sensibilidad musical es innata. Los bebés de dos meses se vuelven hacia sonidos consonantes, o placenteros, y se apartan de los disonantes. Cuando el acorde que resuelve una sinfonía nos produce un delicioso escalofrío, se activan en el cerebro los mismos centros de placer que operan al comer chocolate, realizar el acto carnal o tomar cocaína.

Este fenómeno encierra un intrigante misterio biológico: ¿por qué la música —universalmente estimada y única en su poderosa capacidad de hacer aflorar emociones— nos resulta tan penetrante y valiosa? ¿Pudo su aparición favorecer la supervivencia humana, facilitando el apareamiento, por ejemplo, como ha propuesto Geoffrey F. Miller, de la Universidad de Nuevo México? ¿Nació para promover la cohesión social en grupos que habían crecido demasiado, como sugiere Robin M. Dunbar, de la Universidad de Liverpool? ¿O, en palabras de Steve Pinker, de la Universidad de Harvard, se trata sólo de una "tarta auditiva", una feliz casualidad de la evolución que cosquillea placenteramente nuestro cerebro?

La neurociencia no ha dado todavía con la respuesta. Pero en los últimos años hemos empezado a adquirir un conocimiento más exacto del lugar y el mecanismo del procesamiento cerebral de la música, lo que debiera establecer la base para resolver cuestiones evolutivas. Contra pronóstico, el estudio de pacientes con daños cerebrales y el análisis de las imágenes del encéfalo de individuos sanos no ha desvelado ningún "centro" de la música. Antes bien, activa ésta diversas áreas repartidas por el cerebro, incluidas las involucradas en otros tipos de cognición. Esas zonas activas varían según la experiencia y la formación musical de cada persona. El oído cuenta con menos células sensoriales (3500 células ciliares internas) que cual-

JOHN STEWART

quier otro órgano sensorial (el ojo, por ejemplo, aloja 100 millones de fotorreceptores). Sin embargo, nuestra respuesta cerebral a la música resulta extraordinariamente adaptable: bastan pocas horas de entrenamiento para modificarla.

Afinar el cerebro

Hasta el advenimiento de las técnicas de formación de imágenes, se obtenía información sobre la forma en que el cerebro percibe la música mediante el estudio de pacientes —famosos compositores incluidos— que hubieran sufrido lesiones, accidentes cerebrovasculares u otros trastornos. En 1933, Maurice Ravel comenzó a presentar síntomas de isquemia cerebral focal (una atrofia que afecta áreas concretas del cerebro). Sus capacidades conceptuales permanecían intactas —podía oír y recordar sus antiguas composiciones y tocar escalas—, pero era incapaz de escribir música. Hablando de *Jeanne d'Arc*, una ópera que planeaba componer, Ravel confiaba a un amigo, "... la ópera está aquí, en mi cabeza. La oigo, pero nunca la escribiré. Se ha terminado. Ya no puedo escribir mi música". Ravel murió cuatro años después, tras una malograda intervención neuroquirúrgica. El caso prestó credibilidad a la idea de que podría no haber un centro cerebral específico de la música.

La experiencia de otro compositor sugirió, además, que la música y el habla se procesan de forma independiente. Tras sufrir un accidente cerebrovascular en 1953, Vissarion Shebalin perdió el habla y la inteligibilidad de lo que se le decía, si bien retuvo la capacidad de escribir música hasta que murió, diez años más tarde. La hipótesis del procesamiento independiente parece, pues, asentada. Con todo, la investigación reciente se muestra más cauta, cuando relaciona rasgos compartidos por la música y el lenguaje: una y otro constituyen medios de comunicación y cada uno cuenta con una sintaxis, una serie de reglas que gobiernan la combinación de elementos (notas y palabras, respectivamente). De acuerdo con Ariruddh D. Patel, del Instituto de Neurociencia en San Diego, las imágenes cerebrales sugieren la existencia de una región en el lóbulo frontal que permite la construcción correcta de la sintaxis, musical y lingüística, mientras que otras regiones se ocupan de aspectos relacionados con el procesamiento del lenguaje y la música.

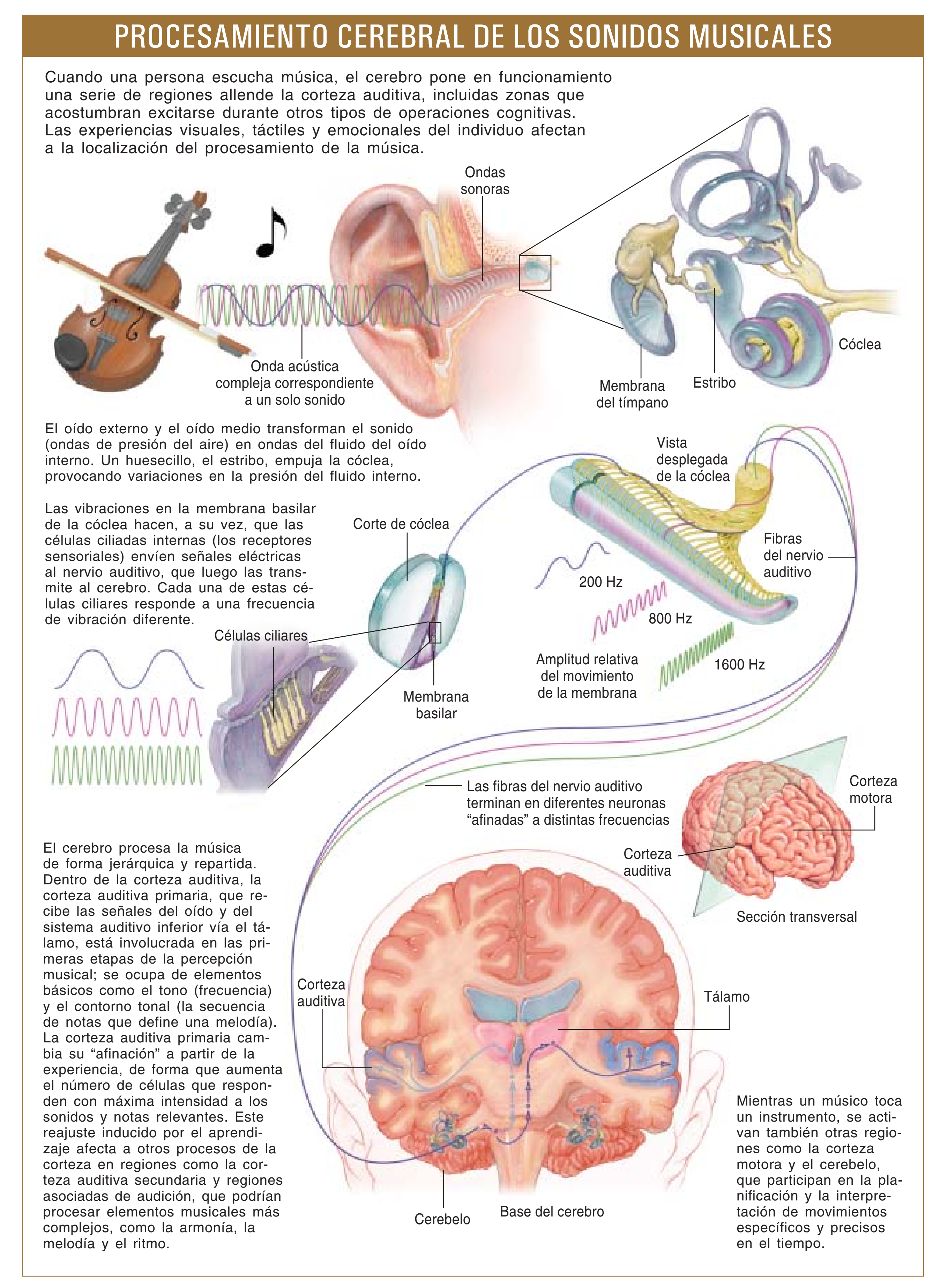
El estudio de las imágenes cerebrales ha arrojado luz sobre la respuesta del cerebro a la música. En particular, ha permitido ahondar en cómo el oído suministra los sonidos al cerebro. Lo mismo que otros sistemas sensoriales, el auditivo muestra una organización jerárquica: consta de una serie de estaciones neuronales de procesado que van desde el oído hasta la corteza auditiva, el nivel más elevado. El procesamiento de sonidos, piénsese en las notas musicales, empieza en el oído interno (cóclea); aquí se descompone un sonido complejo (el que produce un violín, por ejemplo) en las frecuencias que lo constituyen. Luego, la cóclea transmite esta información a lo largo de fibras del nervio auditivo —cada una con "afinación" distinta—, que operan como trenes de descargas neuronales. Por fin, estos trenes llegan a la corteza auditiva en el lóbulo temporal. Cada célula del sistema auditivo cerebral está "afinada" para responder de forma óptima a una nota o frecuencia concreta; la curva de afinación de una célula se solapa con la curva de las células vecinas, de forma que no quedan huecos en la percepción del espectro acústico. De hecho, puesto que las células vecinas están afinadas a frecuencias similares, la corteza auditiva levanta una suerte de "mapa de frecuencias" a través de su superficie.

Pero la música entraña mayor complejidad que un simple sonido aislado. Consiste en una secuencia de sonidos, cuya percepción depende de la comprensión de las relaciones entre ellos. Diversas áreas del cerebro participan en el procesamiento de los componentes de la música. Consideremos el tono, o frecuencia, de una nota. Los expertos creían que las células "afinadas" para responder a una frecuencia específica reaccionaban siempre de la misma forma al detectarla.

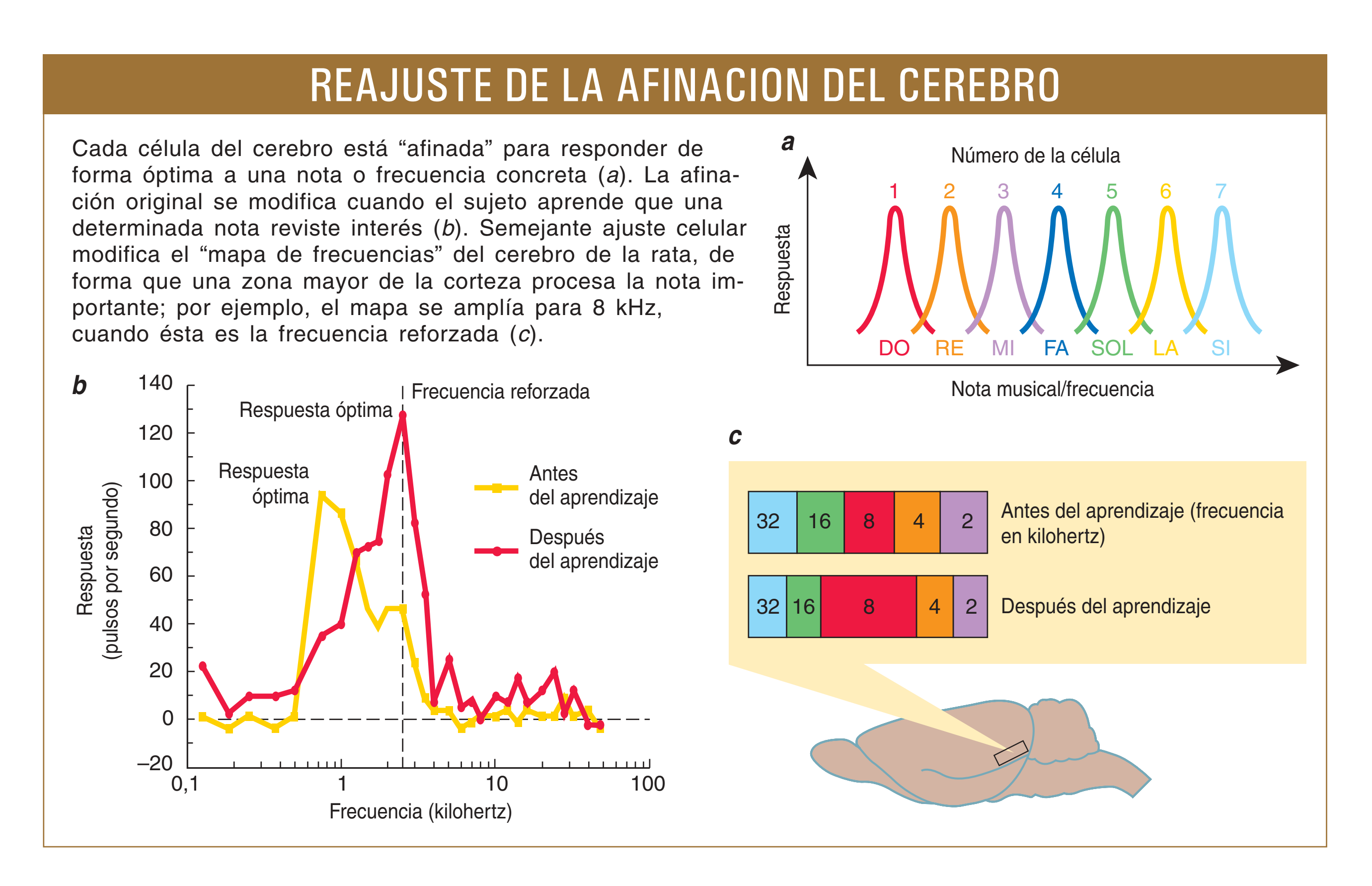
Sin embargo, a finales de los años ochenta del siglo pasado, esa tesis empezó a cuartearse. En mi laboratorio de la Universidad de California en Irvine, Thomas M. McKenna y el autor estudiaron el contorno tonal, la secuencia de notas que define una melodía. Construimos diferentes melodías a partir de distintas combinaciones de las mismas cinco notas y después registramos, en cortezas auditivas de gatos, las respuestas de determinadas neuronas. (Por respuesta debe entenderse número de descargas.) Vimos que la respuesta variaba según el contorno tonal, es decir, dependía de la posición de cada nota dentro de la melodía. Las células podrían excitarse con mayor intensidad si la nota en cuestión viene precedida por otra que cuando es la primera. Además, la reacción es distinta cuando la nota forma parte de una melodía ascendente (de grave a agudo) que cuando pertenece a una melodía descendente o más compleja. Estos hallazgos subrayan la importancia del contorno tonal: el procesamiento de la música en el sistema auditivo no resulta tan sencillo como la transmisión de sonido en el teléfono o en un sistema estereofónico.

Resumen/El cerebro musical

- La música ha estado presente en todas las sociedades humanas desde los albores de la cultura. Según parece, la sensibilidad musical constituye un rasgo innato; hasta los bebés de dos meses se sienten atraídos por sonidos agradables.
- Numerosas regiones cerebrales participan en la percepción de la música y en las emociones que ésta evoca. El cerebro se reajusta para responder con mayor intensidad a sonidos musicales potenciados mediante refuerzo conductual.
- Los expertos que estudian el procesamiento cerebral de la música están sentando las bases de nuestro conocimiento del valor de la misma para el hombre.



ANDREW SWIFT



REAJUSTE DE LA AFINACION DEL CEREBRO

Cada célula del cerebro está "afinada" para responder de forma óptima a una nota o frecuencia concreta (*a*). La afinación original se modifica cuando el sujeto aprende que una determinada nota reviste interés (*b*). Semejante ajuste celular modifica el "mapa de frecuencias" del cerebro de la rata, de forma que una zona mayor de la corteza procesa la nota importante; por ejemplo, el mapa se amplía para 8 kHz, cuando ésta es la frecuencia reforzada (*c*).

LAURIE GRACE

Si bien la mayor parte de las investigaciones se han centrado en la melodía, revisten igual interés el ritmo (la longitud relativa de las notas y de los silencios entre ellas), la armonía (la relación de dos o más notas simultáneas) y el timbre (lo que diferencia el sonido de dos instrumentos emisores de la misma nota). Algunos estudios indican que en el ritmo se involucra más uno de los dos hemisferios, si bien discrepa en la identificación del mismo. El problema estriba en que distintas tareas e incluso distintos estímulos rítmicos requieren capacidades de procesamiento distintas. Por ejemplo, el lóbulo temporal izquierdo parece que procesa mejor los estímulos breves que el lóbulo temporal derecho; así, estaría más activo cuando nos concentramos en el ritmo de sonidos musicales cortos.

Lo mismo ocurre con la armonía, de forma todavía más clara. Los estudios de las imágenes tomadas de la corteza cerebral encuentran una mayor activación en las regiones auditivas del lóbulo temporal derecho cuando el individuo se concentra en los aspectos armónicos de la música. El timbre se ha "asignado", de preferencia, al lóbulo temporal derecho. Los pacientes a los que se les ha eliminado el lóbulo temporal (para tratar apoplejías, por ejemplo) muestran dificultad para diferenciar los timbres si se les ha extirpado tejido del hemisferio derecho, pero no del izquierdo. Además, el lóbulo temporal derecho se activa en individuos normales cuando se aprestan a diferenciar entre timbres diversos.

La respuesta cerebral depende también de la experiencia y la educación musical del oyente. Basta incluso un breve entrenamiento para modificar las reacciones del cerebro. En este contexto, diez años atrás creíase que las células de la corteza auditiva tenían una afinación "fija". Sin embargo, nuestros estudios sobre la melodía sugieren que esta afinación puede alterarse mediante el aprendizaje, de forma que ciertas células incrementan su respuesta ante sonidos que atraen la atención y se almacenan en la memoria.

Para averiguarlo, Jon S. Bakin, Jean-Marc Edeline y el autor emprendieron, en los años noventa, una serie de experimentos; se trataba de resolver la cuestión de si cambiaba la organización básica de la corteza auditiva cuando un individuo se percataba de la importancia de una nota determinada. Expusimos a conejillos de Indias a un gran número de notas distintas y registramos la respuesta de células de la corteza auditiva para establecer qué notas producían la respuesta más intensa.

A continuación, reforzamos la audición de una determinada nota, hacia la que no existía ninguna preferencia previa, mediante la aplicación de una suave descarga en la pata cada vez que sonaba. Las ratas aprendieron la asociación al cabo de pocos minutos. Medimos de nuevo la respuesta de las células, inmediatamente tras el entrenamiento y a varios intervalos hasta dos meses después. La afinación con máxima respuesta neuronal se había desplazado desde la frecuencia original a la frecuencia de la nota reforzada mediante la señal eléctrica.

Por tanto, el aprendizaje reajusta el cerebro de forma que aumenta el número de células que responden con mayor intensidad a los sonidos que se potencian mediante refuerzo conductual. La nueva "afinación" se extiende por toda la corteza, modificando el mapa de frecuencias de forma que una mayor superficie de la corteza procesa las notas refor-

zadas. Para determinar a qué frecuencias muestra mayor sensibilidad un animal, basta con definir el "mapa" de frecuencias de su corteza auditiva.

El reajuste de la afinación resultó asombrosamente duradero: se fortaleció sin necesidad de adiestramiento adicional y persistió durante meses. Estos hallazgos propiciaron un incremento de las investigaciones que sugerían que el cerebro inscribe la importancia aprendida de un estímulo dedicando mayor número de células al procesamiento de dicho estímulo. Si bien no resulta posible registrar la actividad de neuronas humanas individuales durante el proceso de aprendizaje, los estudios basados en imágenes del cerebro detectan cambios en la magnitud media de las respuestas de miles de células en diversas regiones de la corteza. En 1998, Ray Dolan y su grupo, del Colegio Universitario de Londres, entrenaron a humanos en una tarea similar, al tiempo que les insistían en la importancia de una nota determinada. Los neurólogos comprobaron que el aprendizaje producía el mismo cambio en la afinación observado en animales. Los efectos a largo plazo de este reajuste cerebral podría explicar por qué reconocemos con prontitud una melodía familiar en una sala ruidosa y por qué las personas que sufren pérdida de memoria debido a la enfermedad de Alzheimer y otras patologías neurodegenerativas recuerdan músicas que aprendieron en el pasado.

Para "oír" música no necesitamos que ningún sonido real nos llegue al oído, basta con imaginarla. Piense en alguna pieza que conozca e "interprétela" en su cabeza. ¿En qué zona cerebral se ejecuta la pieza? En 1999, Andrea R. Halpern, de la Universidad de Bucknell, y Robert J. Zatorre, de la Universidad McGill en Montreal, sometieron a examen el cerebro de voluntarios legos en música mientras escuchaban una partitura o imaginaban escucharla. Los neurólogos hallaron que buen número de las áreas temporales que participaban en la audición de melodías se activaban también cuando dichas melodías sólo se imaginaban.

Desarrollo cerebral

Los estudios entre músicos han ampliado los descubrimientos anotados más arriba, confirmando la capacidad del cerebro de reajustar sus circuitos en apoyo de la actividad musical. De la misma forma que el adiestramiento incrementa el número de células que responden a un sonido cuando éste se convierte en importante, un aprendizaje prolongado aumenta la intensidad de las respuestas y los cambios físicos operados en el cerebro. Los músicos que ensayan muchas horas al día, a lo largo de años, muestran tales efectos: responden a la música de forma distinta de los legos y presentan un hiperdesarrollo de ciertas regiones cerebrales.

Christo Pantev se hallaba en la Universidad de Münster cuando, en 1998, dirigió uno de esos estudios. Observó que, al escuchar una interpretación al piano, y comparado con un lego, el músico activa un 25 por ciento más de sus regiones auditivas del hemisferio izquierdo. Efecto de las notas musicales que no ocurre si se trata de otros sonidos. Además, esta expansión de la zona de respuesta resulta mayor cuanto más joven se inició el sujeto en los estudios musicales. A tenor de la investigación con niños, la experiencia musical precoz puede facilitar el desarrollo. En 2004, Antoine Shahin, Larry E. Roberts y Laurel J. Trainor, de la Universidad McMaster en Ontario, registraron respuestas cerebrales al sonido de un piano, un violín y a notas puras, en niños de cuatro y cinco años. Los que habían convivido en un ambiente familiar melómano mostraron una mayor actividad auditiva del cerebro, equiparable a niños tres años mayores que no estaban en contacto con la música.

Los músicos pueden presentar mayor respuesta a sonidos, en parte porque su corteza auditiva es más extensa. Peter Schneider y sus colaboradores, de la Universidad de Heidelberg, declararon en 2002 que el volumen de la misma era un 130 por ciento mayor en los músicos. El porcentaje de incremento en volumen se relacionó con el nivel de aprendizaje musical, con la coda consiguiente de que el aprendizaje de la música aumenta el número de neuronas dedicadas a su procesamiento.

Además, el cerebro de un músico concede un área mayor para el control motor de los dedos que han de ejecutar la pieza. En 1995, Thomas Ebert y su grupo, de la Universidad de Constanza, observaron que las regiones del cerebro que reciben estímulos sensoriales procedentes del segundo al quinto (índice a meñique) dedo de la mano izquierda eran significativamente mayores en el caso de violinistas; se trata, precisamente, de los dedos que realizan movimientos rápidos y complejos cuando se toca el violín. En cambio, no observaron ningún incremento de las zonas de la corteza que reciben la información de la mano derecha, responsable del control del arco y no precisa de virtuosismo en los dedos. Los legos no presentan estas diferencias. Además, Pantev, ahora en el Instituto de Investigación Rotman de la Universidad de Toronto, informó en 2001 de que el cerebro de trompetistas profesionales reacciona con notable intensidad sólo al sonido de la trompeta, pero no al de un violín, por ejemplo.

Los músicos deben también desarrollar una mayor habilidad para utilizar las dos manos, en particular para la ejecución en el teclado. Cabría, pues, esperar que esta mayor coordinación entre las regiones motoras de los dos hemisferios contara con una base anatómica. Parece que así es. El cuerpo calloso anterior, que contiene el haz de fibras que interconecta las dos áreas motoras, es mayor en los músicos que en los legos. A su vez, el incremento es mayor cuanto más temprana la educación musical. Otros estudios sugieren que el tamaño real de la corteza motora, así como del cerebelo —una región en la parte posterior del encéfalo responsable de la coordinación motora— es mayor en los músicos.

Emociones musicales

Amén de indagar el procesamiento cerebral de los sonidos musicales, se investiga el mecanismo mediante el cual despiertan intensas emociones. Los estudios pioneros que John A. Sloboda, de la Universidad de Keele, llevó a cabo en 1991, reve-

Percepción musical de los bebés

AUNQUE MUCHOS CREEN no tener aptitudes para la música, todos contamos con cierta sensibilidad musical. De hecho, para encontrar alguien con un "cerebro musical" basta con observar a cualquier bebé. Antes de adquirir el don del lenguaje, los bebés ya muestran una habilidad extraordinaria para reaccionar ante la música. Quizá por ello los padres y otras personas se comunican instintivamente con los pequeños como si entonaran una canción, utilizando amplios espectros de frecuencias y frases melódicas que imitan los sonidos del bebé. Todas las culturas utilizan esa comunicación maternal.

Los bebés no sólo reaccionan positivamente ante este tipo de estímulo, sino que, además, parecen reclamarlo. En un estudio realizado en 1999 por Laura-Lee Balkwill y William F. Thompson, ambos entonces en la Universidad York de Toronto, madres norteamericanas y de la India cantaban la misma canción en presencia de su bebé y en ausencia de éste. Después, otros participantes juzgaban correctamente en cuál de las dos grabaciones estaba presente el bebé. El estudio concluyó que debían existir algunos elementos musicales comunes en ambas culturas, pues los oyentes de las grabaciones detectaban si el bebé estaba presente o no, independientemente de si oían la canción en su propia lengua o en otra.



EL HABLA CON ENTONACION MUSICAL que remeda los sonidos del bebé (*motherese*) es común a todas las culturas.

¿Cómo podemos saber si un bebé se percata de la música si aún no puede hablar para contarlo? Utilizando medidas objetivas de su comportamiento. Por ejemplo, un bebé está sentado en el regazo de su madre; a la izquierda y a la derecha se instalan dos altavoces y cajas adyacentes de plástico transparente. En su estado normal, las cajas aparecen oscuras, pero si el bebé gira su cabeza hacia una de ellas, recibe un premio: la caja se ilumina y dentro aparece un muñeco animado (un perro o un mono de trapo). Durante la prueba, un investigador manipula marionetas u otros objetos enfrente del bebé para atraer su atención. Un estímulo musical (una nota o una melodía) se emite repetidamente por uno de los altavoces. En momentos aleatorios, el experimentador pulsa un botón escondido que cambia el estímulo. Si el bebé nota la diferencia y se gira hacia el altavoz, se le premia con la activación del muñeco.

Tales pruebas han mostrado que los bebés distinguen, igual que los adultos, entre dos notas musicales adyacentes. También perciben los cambios en el tempo (la velocidad a la que se interpreta la música) y el ritmo. Reconocen una melodía si se interpreta en otro tono. Respaldan estos estudios los recientes hallazgos de Sandra Trehub, de la Universidad de Toronto. Esta investigadora ha comprobado que los bebés de dos a seis meses de edad prefieren los sonidos consonantes a los disonantes. Parece que el aprendizaje de la música se inicia mucho antes, quizás *in utero*. Peter Hepper, de la Universidad Queen's de Belfast, observó que, quince días antes del parto, los fetos distinguían entre una canción nueva y la sintonía de la serie de televisión "Neighbors" (Vecinos), escuchada a diario por sus madres durante semanas de embarazo.

laron que más del 80 por ciento de los adultos muestreados expresaron respuestas físicas a la música: escalofríos, risa o lágrimas. En un estudio realizado en 1995 por Jaak Panksepp, de la Universidad de Bowling, el 70 por ciento de varios centenares de jóvenes entrevistados, varones y mujeres, declararon que les gustaba la música "porque evoca emociones y sentimientos". Este trabajo se vio reforzado por los resultados que, en 1997, obtuvo Carol L. Krumhansl, de la Universidad de Cornell. Con su grupo colaborador, Krumhansl anotó el ritmo cardíaco, la presión sanguínea, la respiración y otros parámetros fisiológicos durante la audición de diferentes piezas musicales que se suponía que expresaban felicidad, tristeza, miedo o tensión. Cada tipo de música evocó un patrón distinto, si bien consistente, de cambio fisiológico entre los individuos.

Hasta fecha reciente, se sabía muy poco sobre los mecanismos cerebrales implicados. Con el caso de Petra López (nombre ficticio) llegó la primera clave. Esta mujer, que ha sufrido daños bilaterales en sus lóbulos temporales, incluidas las regiones de la corteza auditiva, muestra normales la inteligencia y memoria generales; no presenta dificultades con el lenguaje. En cambio, no se percata ni reconoce música alguna, aunque se trate de una pieza que ya conocía o de una canción nueva que ha oído repetidamente. No distingue entre dos melodías, por diferentes que sean. Sin embargo, muestra reacciones emocionales normales ante diversos tipos de música. Su capacidad de identificar una emoción con una selección musical concreta es completamente normal. De este caso inferimos que se necesita el lóbulo temporal para comprender una melodía, pero no para producir una reacción emocional; ésta es subcortical e implica, también, a los lóbulos frontales.

En 2001, Anne Blood y Zatorre, de la Universidad McGill, recurrieron a las técnicas de formación de imágenes del cerebro para acotar con mayor precisión las regiones cerebrales comprometidas en las reacciones emocionales provocadas por la música. El estudio utilizaba estímulos emocionales suaves, asociados a la consonancia y a la disonancia. Un intervalo consonante corresponde a una relación de frecuencias (entre las dos notas que determinan el intervalo) sencilla. Ofrecen un ejemplo el *do* central y el *sol* central: la relación entre sus

IT INTERNATIONAL/*eStock Photo*



FLAUTA DE HUESO encontrada en un yacimiento francés de hace 32.000 años. Constituye una prueba palmaria de la afición musical del hombre desde los albores de la cultura.

frecuencias (260 y 390 hertz, respectivamente) es 2:3; su interpretación simultánea define un acorde de "quinta perfecta" de sonoridad agradable. Un *do* central y un *do* sostenido (277 hertz), en cambio, presentan una relación de frecuencias "compleja", alrededor de 8:9; su interpretación simultánea produce un sonido que se considera desagradable, áspero.

¿Qué mecanismos cerebrales subyacen a esta experiencia? Las imágenes obtenidas mediante TEP (tomografía por emisión de positrones), registradas mientras los sujetos escuchaban acordes consonantes o disonantes, mostraron la intervención de diversas regiones del cerebro en las reacciones emocionales. Los acordes consonantes activaban la región orbitofrontal (parte del sistema de recompensa) del hemisferio derecho y también parte de un área debajo del cuerpo calloso. Por el contrario, los acordes disonantes activaban la circunvolución del parahipocampo derecho. Por tanto, por lo menos dos sistemas, cada uno relacionado con diferentes tipos de emoción, se activan cuando el cerebro procesa emociones vinculadas a la música. Todavía queda por descubrir cómo los diferentes patrones de actividad en el sistema auditivo podrían relacionarse con estas regiones de reactividad diferenciada de los hemisferios.

En el mismo año, Blood y Zatorre avanzaron un paso más en la comprensión del mecanismo a través del cual la música produce placer. Cuando sometieron a examen el cerebro de músicos que sentían una euforia estremecedora al escuchar música, observaron en las imágenes que se activaba alguno de los mismos sistemas de recompensa estimulados por la comida, el sexo y las drogas de adicción.

En resumen, hasta la fecha, se sabe que existe una base biológica para la música y que el cerebro cuenta con una organización funcional para la música. Parece bastante clara, incluso en este estadio inicial de la investigación, la intervención de diversas regiones cerebrales en el procesamiento de aspectos concretos de la música, apoyando la percepción (cuando se aprehende una melodía, por ejemplo) así como evocando emociones. Los músicos parecen contar con especializaciones adicionales, sobre todo un hiperdesarrollo de ciertas estructuras cerebrales. Estos efectos demuestran que el aprendizaje modifica la actividad del cerebro, incrementando la respuesta de células individuales y el número de células que reaccionan con intensidad a sonidos que adquieren relevancia para el individuo. Conforme avanza la investigación sobre la música y el cerebro, ahondaremos en el porqué de la música así como en sus múltiples facetas.

ALEXANDER MARSHACK

El autor

Norman M. Weinberger se formó en la Universidad Case Western Reserve. Trabaja en el departamento de neurobiología y comportamiento de la Universidad de California en Irvine, donde fundó el Centro de Neurobiología del Aprendizaje y la Memoria.

Bibliografía complementaria

THE ORIGINS OF MUSIC. Dirigido por Nils L. Wallin, Björn Merker y Steven Brown. MIT Press, 1999.

THE PSYCHOLOGY OF MUSIC. Segunda edición. Dirigido por Diana Deutsch. Academic Press, 1999.

MUSIC AND EMOTION: THEORY AND RESEARCH. Dirigido por Patrik N. Juslin y John A. Sloboda. Oxford University Press, 2001.

THE COGNITIVE NEUROSCIENCE OF MUSIC. Dirigido por Isabelle Peretz y Robert J. Zatorre. Oxford University Press, 2003.

Adaptación al estrés celular

El papel de la cromatina

Las células de los organismos sufren cambios constantes en su entorno. Cuando éstos ponen en peligro la vida de las mismas, crean una situación de estrés. Para sobrevivir a tal adversidad, las células utilizan un conjunto de estrategias conocidas como las respuestas de adaptación al estrés celular. Una de ellas, quizá la que reviste mayor importancia, consiste en regular la expresión de ciertos genes que protegen a las células mediante la modificación de la división, la morfogénesis, el metabolismo y otros aspectos fisiológicos.

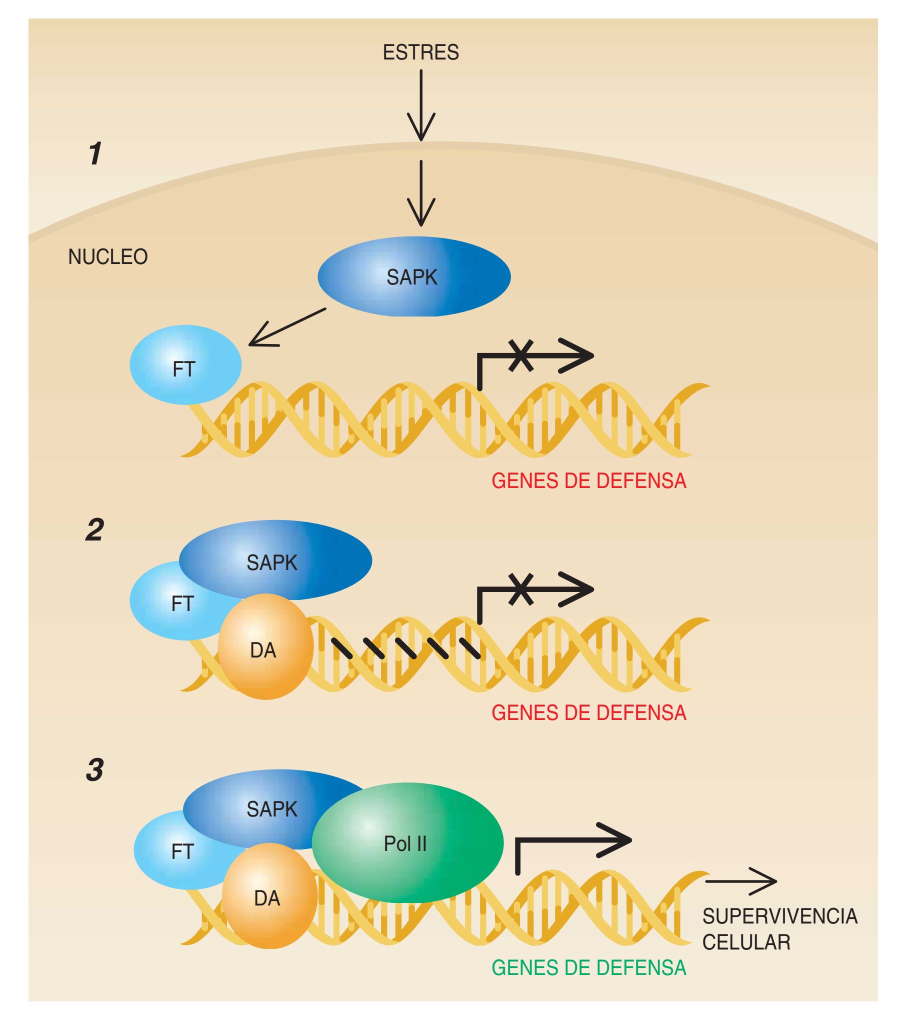
El estrés provoca, en el interior de la célula, la activación de las SAPK (proteínas quinasas activadas por estrés), que han persistido ("se conservan") en organismos muy diversos. Las proteínas p38 en mamíferos y Hog1 en levadura constituyen los prototipos de esta familia de moléculas. Sabemos que su activación resulta esencial para desencadenar las respuestas de adaptación al estrés celular, pero aún nos hallamos lejos de conocer su papel en la mediación de la regulación génica.

La investigación en torno a la quinasa Hog1 de levadura ha sacado a la luz algunos de los mecanismos de acción de las SAPK. Uno de ellos consiste en modificar factores de transcripción, o activadores, mediante fosforilación. Pero, ¿constituye la única forma de modular la expresión génica?

En nuestro laboratorio hemos identificado otro mecanismo basado en el reclutamiento del complejo responsable de la síntesis de ARN mensajero, la ARN polimerasa II. En este caso, la SAPK se une a los promotores de respuesta al estrés. Tal interacción no sólo permite reclutar la ARN Pol II, sino que modifica también la cromatina de la región promotora de los genes de estrés, logrando así su correcta expresión.

La modificación de la cromatina en las regiones promotoras de los genes constituye, en numerosas ocasiones, un prerrequisito para la correcta expresión de los mismos. Se trata de una alteración estructural que puede producirse de varias formas; por ejemplo, mediante la acetilación de aminoácidos específicos de las histonas (las proteínas encargadas del empaquetamiento del ADN).

Los estudios acometidos en la enzima Hog1 demuestran que los cambios mediados por las SAPK en la acetilación de las histonas de los promotores de respuesta a estrés resultan esenciales para el buen funcionamiento de los mismos. En este proceso, la desacetilación de los promotores mediada por el complejo de la desacetilasa Rpd3-Sin3 constituye una etapa clave. La proteína Rpd3 pertenece a una fami-



Mecanismo de regulación de la expresión génica en respuesta al estrés celular. (*1*) Los sensores de estrés generan una señal que se traduce en la activación de la SAPK y su posterior localización nuclear. Ya en el núcleo de la célula, la SAPK activa los promotores mediante su unión a factores de transcripción específicos (FT). (*2*) Esta interacción recluta el complejo de la desacetilasa (DA) y modifica las histonas de los promotores. (*3*) Finalmente, el complejo de la ARN polimerasa II transcribe el gen de adaptación al estrés.

lia de cinco histonas desacetilasas de levadura y Sin3 corresponde a una subunidad reguladora que forma parte del complejo de desacetilación. Las células deficientes en Rpd3-Sin3 no sobreviven al estrés, puesto que no logran inducir la expresión de los genes de adaptación.

Profundizar en estos mecanismos de adaptación al estrés celular reviste interés porque las proteínas que intervienen en el proceso desempeñan importantes funciones fisiológicas. De hecho, los cambios en las actividades de las SAPK debidos, por ejemplo, a mutaciones, originan alteraciones en la proliferación celular, la generación de procesos inflamatorios u otros procesos patológicos. Cabe esperar que los hallazgos derivados de este estudio facilitarán trabajos posteriores dedicados a modificar la actividad de dichas proteínas en casos de disfunción.

FRANCESC POSAS
y EULÀLIA DE NADAL
Unidad de Señalización Celular,
Departamento de Ciencias
Experimentales y de la Salud,
Universidad Pompeu Fabra,
Barcelona

La muda en Artrópodos

Su primer registro fósil

El reciente hallazgo de un ejemplar único del pequeño artrópodo *Marrella splendens*, fosilizado en el momento en que procedía a salir de su caparazón, hace unos 505 millones de años (Ma), nos ha permitido confirmar que los primeros artrópodos ya mudaban su exosqueleto para poder aumentar de tamaño, y lo hacían de manera semejante a como lo hacen sus descendientes hoy en día.

Los artrópodos constituyen el grupo animal con mayor diversidad de especies de la actualidad. Sin embargo, cuando estudiamos el registro fósil se aprecia que esta condición ya se daba casi desde el principio de la evolución, tras la gran radiación del período Cámbrico, que aconteció hace unos 540 millones de años.

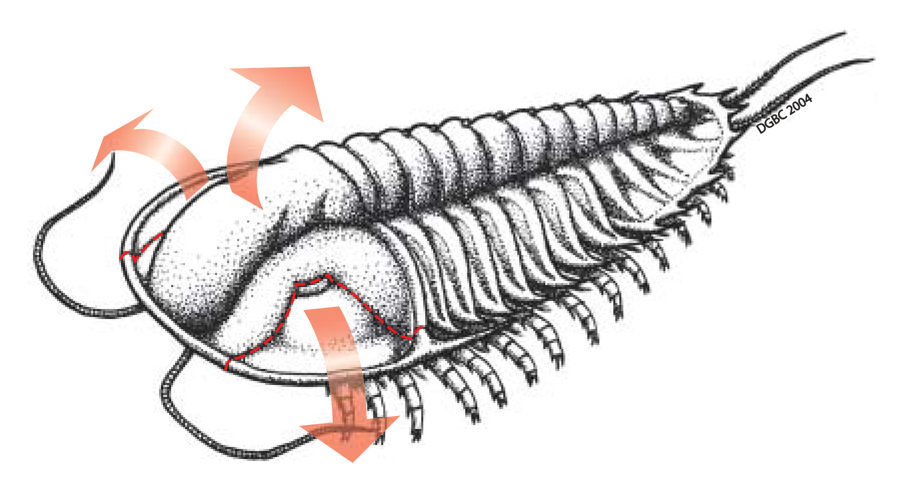
Fue en esta "explosión" del Cámbrico cuando, en unos pocos millones de años, se originaron la mayoría de los filos, o grandes grupos animales, conocidos. Durante este período de la historia de la Tierra, los artrópodos presentaban ya todo un gradiente de tamaños y multitud de modos de vida: desde artrópodos microscópicos filtradores, integrantes del zooplancton, hasta los mayores animales del momento, un grupo de depredadores llamados Anomalocáridos, que alcanzaban el metro de longitud, pasando por fitófagos y carroñeros.

Aunque la mayoría de aquellos artrópodos del Cámbrico desaparecieron, otros sobrevivieron, entre ellos los primeros crustáceos y quelicerados, antecesores de los cangrejos y escorpiones modernos, así como los que más tarde dieron lugar a insectos y miriápodos.

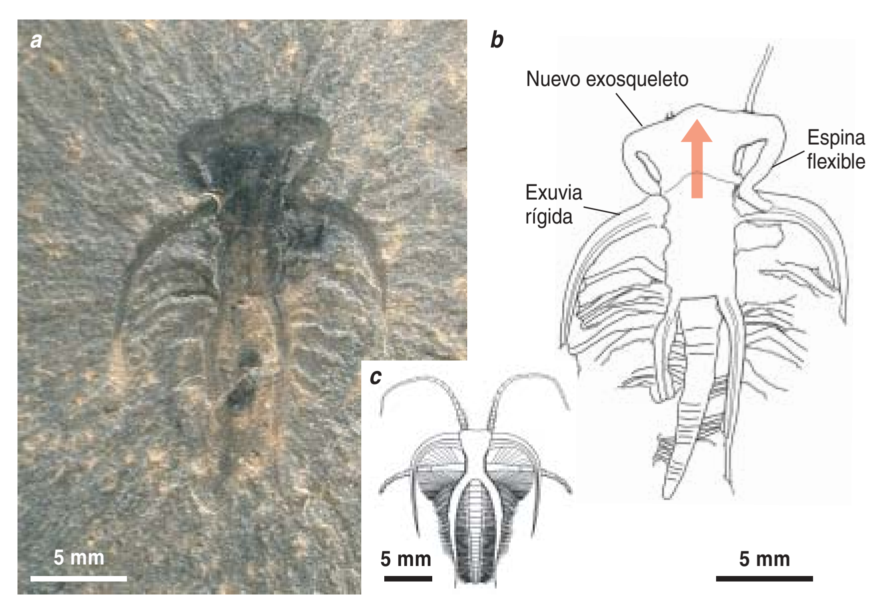
El gran éxito de los artrópodos radica, en parte, en que presentan una dura coraza externa, o *exosqueleto*, que les protege de los agentes meteorológicos y, en buena medida, de los ataques de depredadores de similar tamaño. Sin embargo, esta misma coraza representa un "talón de Aquiles": necesitan deshacerse de ella regularmente para poder aumentar de tamaño, en un proceso conocido como muda o *ecdisis*.

La ecdisis es un proceso complejo, en el que se reabsorbe parcialmente la parte interna del exosqueleto, se abre la coraza, y de ella sale el animal con una cutícula flexible, dejando atrás una *exuvia*, o viejo exosqueleto vacío. El artrópodo, con un aumento de presión interna, bien por ingesta de agua o de aire dependiendo del medio en que se encuentre, aumenta de volumen aprovechando que su exosqueleto es aún flexible. En cuestión de horas el animal alcanzará el nuevo tamaño y su exosqueleto se endurecerá. Durante este período, los artrópodos son especialmente vulnerables, por lo que generalmente llevan a cabo la muda en lugares protegidos, como cavidades naturales o agujeros excavados por ellos mismos, y en las horas de mayor oscuridad.

El espesor y grado de mineralización del exosqueleto varía, desde el de una araña o una mosca, al de un centollo. Los artrópodos con esqueletos más mineralizados suelen tardar más en realizar todo el proceso de la muda. Tal era el caso de los Trilobites, los artrópodos mejor conocidos de la era Paleozoica (540-250 Ma), que presentaban un elaborado proceso de apertura de las múltiples partes de su coraza a lo largo de "líneas de sutura" preestablecidas (*véase la figura 1*). Se cree que la mayoría de los fósiles de Trilobites corresponden a exuvias vacías, más o menos desarticuladas, dejadas tras la muda. Estos restos mineralizados, al igual que



1. Proceso hipotético de apertura del exosqueleto en el trilobites de Burgess Shale *Olenoides serratus*, a lo largo de "líneas de sutura" (*rayas discontinuas*).



2. Ejemplar del artrópodo de Burgess Shale *Marrella splendens* fosilizado en el momento de egresión de la exuvia (*a*), dibujo de cámara clara del mismo ejemplar (*b*) y reconstrucción general (*c*).

las conchas de los bivalvos o los huesos de los vertebrados, tienen generalmente un mayor potencial de conservación tafonómica, esto es, son más resistentes a los procesos que se desarrollan entre la muda, o la muerte del organismo, y la recuperación del fósil millones de años más tarde. Durante las fases tafonómicas más tempranas se suelen perder las partes blandas por la acción de depredadores, carroñeros y organismos descomponedores, incluso antes del enterramiento.

Algunas localidades de fósiles, conocidas como *Konservat-Lagerstätten*, proporcionan a los paleontólogos ventanas excepcionales para "ver" la vida en el pasado, ya que conservan las partes blandas de los organismos, que normalmente se pierden durante el proceso de fosilización. La localidad más famosa de este tipo en el período Cámbrico es Burgess Shale, en las Montañas Rocosas de Canadá. En ella no sólo se han encontrado más de 170 especies distintas —67 de ellas artrópodos—, sino que, además, éstas presentan un estado de conservación tan fino, que permite reconocer ojos, agallas, tubos digestivos e incluso vasos sanguíneos. Entre ellos destaca por su abundancia el artrópodo *Marrella splendens*, de unos 2 cm de longitud. Un ejemplar fósil de este animal se ha encontrado en plena ecdisis, y muestra la zona cefálica y sus espinas, aún con la cutícula flexible, saliendo a través de una abertura en la parte frontal del cuerpo (*véanse figuras 2a y 2b*). La parte distal de las espinas laterales, así como el resto del cuerpo se encuentra todavía dentro del viejo exosqueleto.

La singularidad de este hallazgo reside en dos hechos extraordinarios. Primero, se requiere la fosilización de partes blandas para que se pueda constatar el proceso de muda, lo que no ocurre más que en Konservat-Lagerstätten. Y segundo, el proceso completo de salida de su exuvia en un artrópodo no mineralizado suele ser de muy corta duración, de unos pocos minutos para una larva de langosta de tamaño similar a *Marrella*, o de 20 minutos para algunas cucarachas.

No es de extrañar pues, que, de los más de 24.000 ejemplares que se han recogido de esta especie, solamente uno se halle en pleno proceso de la muda. Marella presenta una estructura relativamente sencilla, compuesta por una zona cefálica con espinas protectoras y dos pares de apéndices, seguida de un cuerpo con unos 25 segmentos, cada uno con un par de apéndices birrámeos, y terminado en un pequeño telson (*véase la figura 2c*). Debido a ello, está considerado como un artrópodo morfológicamente primitivo, incluido dentro de su propio grupo —los Marrellomorpha—, que según diversos estudios filogenéticos se sitúa en la base de los Schizoramia, el grupo que incluye a los crustáceos, quelicerados y los desaparecidos trilobites.

Conviene señalar que la ausencia de líneas de sutura visibles en otros ejemplares de *Marrella*, al igual que en los artrópodos actuales, podría tratarse de un carácter *plesiomórfico*, u original. Por lo tanto, el tipo de muda en Trilobites, con líneas de sutura muy conspicuas, sería un carácter *apomórfico*, o derivado, que probablemente apareció en paralelo con la mineralización del exosqueleto.

En definitiva, nos hallamos en situación de confirmar que un proceso tan importante en el ciclo de vida de los artrópodos como es la muda, ocurría ya, y de forma muy similar, desde el principio de la evolución de este filo.

DIEGO GARCÍA-BELLIDO CAPDEVILA
Depto. de Paleobiología,
Royal Ontario Museum, Toronto

El virus del oeste del Nilo

En Yucatán

El virus del oeste del Nilo (VON) causa encefalitis en humanos, equinos y numerosas especies de aves. Se encuentra en Africa, Asia, el Medio Oriente, Europa y, desde 1999, también en Norteamérica. En su ciclo de vida intervienen mosquitos y aves, convirtiéndose éstas en huéspedes reservorios del virus. Ni hombres ni caballos participan en el ciclo de transmisión del VON, pues este flavivirus se encuentra en su sangre en concentraciones muy bajas y durante períodos muy cortos de tiempo.

En marzo de 2000, nuestro grupo de investigación comenzó la vigilancia para determinar si el VON

llegaba a la península mexicana de Yucatán a través de las aves migratorias provenientes de los EE.UU. Mediante el análisis de los sueros de aves migratorias, así como de las residentes, estudiamos el papel que las primeras desempeñan en la diseminación de este virus. El trabajo formó parte de una colaboración entre la Universidad estatal de Colorado y la Universidad Autónoma de Yucatán. La financiación, estadounidense, llegó de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) y los Institutos Nacionales de Salud (NIH).

La península de Yucatán constituye una ruta principal de migración para un gran número de especies de aves migratorias provenientes del noreste, medio oeste y sur de los EE.UU. El estudio se centró en tres enclaves del estado de Yucatán, situados en reservas ecológicas (la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, SEMARNAT, concedió los permisos necesarios para acometer el trabajo): el rancho Hobonil (alrededor de 1200 hectáreas), perteneciente a la localidad de Tzucacab, en el centro de la península de Yucatán, que está administrado por la Universidad Autónoma de Yucatán y se utiliza para diversos estudios relacionados con la producción animal; la Biosfera Ría Celestún (unas 60.000 hectáreas), un estuario del noroeste del estado de Yucatán administrado por la SEMARNAT, en el que medran manglares rojos, manglares negros y otras especies propias de zonas costeras y pantanosas; y, por último, la selva baja caducifolia de Cuxtal (10.000 hectáreas), ubicada al sur de la ciudad de Mérida y administrada por el Ayuntamiento de Mérida.

Las aves se capturaron mediante redes de niebla, que se colocaron entre las 6:00 y las 13:00 horas. Se les extrajo una pequeña cantidad de sangre y, luego, se liberaron. Los sueros se analizaron para determinar la presencia de anticuerpos específicos para diferentes flavivirus y para el VON; se utilizó la técnica de ensayo inmunoabsorbente de enlace enzimático mediante bloqueo de epítopos (ELISA). La ventaja de esta prueba reside en que no necesita reactivos específicos para cada especie analizada.



1. Ejemplares macho (*derecha*) y hembra (*izquierda*) de *Culex tarsalis*, uno de los mosquitos que transmite el virus del oeste del Nilo.



2. Ejemplar adulto de *Dumetella carolinensis*, capturado para el estudio serológico.

Se capturaron más de 8600 aves, pertenecientes a 182 especies diferentes y a 14 órdenes. Las primeras aves con anticuerpos del VON aparecieron en diciembre de 2002. En total, se han encontrado anticuerpos del VON en siete especies de aves migratorias (*Dumetella carolinensis, Empidonax minimus, Hirundo rustica, Passerina cyanea, Pheucticus ludovicianus, Wilsonia citrina* y *Wilsonia pusilla*) y dos especies residentes (*Cyanocompsa parellina* y *Myiarchus tyrannulus*).

Anticuerpos del VON también se detectaron en 3 de los 252 caballos muestreados entre julio y octubre de 2002 en el estado de Yucatán. Recientemente, se han publicado estudios serológicos de infecciones por el VON en caballos en 5 estados mexicanos. A tenor de estos resultados, la circulación del VON en México debió de comenzar alrededor de julio de 2002. Estudios recientes en los EE.UU. demuestran que muchas especies de mamíferos salvajes y domésticos se han infectado con el VON; sin embargo, el papel de los mamíferos en el ciclo de transmisión del VON no re-

sulta crítico para la supervivencia del virus a largo plazo.

La velocidad de diseminación del VON en los EE.UU. y el número de especies animales afectadas (225 aves, 49 especies de mosquitos y al menos 31 mamíferos) resulta sorprendente. Se plantean muchas dudas acerca de lo que ocurrirá en Centro y Sudamérica: ¿Cómo repercutirá en la fauna del resto de los países del continente americano? ¿Qué especies de aves, mamíferos, reptiles y anfibios se infectarán? ¿Cuál será el impacto de este virus en los humanos que ya han sido infectados por el dengue, la encefalitis de San Luis, el virus de la fiebre amarilla o algún otro flavivirus? Estas y otras cuestiones resultan decisivas para abordar el impacto ecológico, epidemiológico, económico y social de la circulación de este virus en América.

MARÍA A. LOROÑO PINO,
BRADLEY J. BLITVICH
y BARRY J. BEATY
Dpto. Microbiología,
Inmunología y Patología
Escuela de Veterinaria
y Ciencias Biomédicas
Universidad Estatal de Colorado
JOSÉ A. FARFÁN ALE
Laboratorio de Arbovirología
Centro de Investigaciones Regionales
DR. HIDEYO NOGUCHI,
Universidad Autónoma de Yucatán

Agricultura prehistórica

Cálculo de su productividad

La aparición de la agricultura trajo consigo uno de los cambios más revolucionarios de la historia de la humanidad. Sin embargo, los numerosos estudios dedicados a sus orígenes se han centrado en la identificación de las regiones donde comenzó, las especies que la conformaron, los sistemas de cultivo o las condiciones ecológicas en que se desarrolló, dejando en un segundo plano la estimación de la productividad de los cultivos prehistóricos. Además, adolece ésta de un alto grado de incertidumbre, pues los métodos de evaluación del rendimiento de los cultivos que se han empleado, basados en pruebas arqueológicas, antropológicas o etnográficas, resultaban, por indirectas, muy especulativas.

Fruto de una colaboración multidisciplinaria de equipos de la Universidad de Barcelona, del Museo de Arqueología de Cataluña y de la Universidad de Lérida, hemos preparado un sistema que evalúa la productividad agraria sin las limitaciones inherentes a los métodos tradicionales. Se fundamenta en los factores biológicos que determinan la productividad. Idóneo ese sistema para cereales cultivados en un biotopo mediterráneo, se fundamenta en el análisis de la composición isotópica en granos fósiles; en concreto, en la concentración de isótopos de carbono estables.

El carbono, componente básico de la materia orgánica, se presenta en la naturaleza a través de dos isótopos estables: el isótopo ^{12}C, mayoritario (aproximadamente el 99 % del CO_2 atmosférico), y el isótopo más pesado ^{13}C. En los vegetales con metabolismo fotosintético C_3 (característico de la mayoría de los cultivos), la relación de ^{13}C a ^{12}C es menor que en la atmósfera. Ese fenómeno se debe a que las plantas privilegian el ^{12}C en el proceso de la fotosíntesis. Tal discriminación contra el ^{13}C será menor si decae la concentración de CO_2 en el interior de la hoja, por cierre de los estomas en momentos de sequía (estrés hídrico) u otros motivos. Con otras palabras, las plantas que se han desarrollado en condiciones de déficit de agua presentarán una biomasa con menor discriminación en ^{13}C (abreviada como $\Delta^{13}C$).

Hace unos 10.000 años, en el inicio del Holoceno, se iniciaba la agricultura en el Creciente Fértil, un arco que comprende las actuales Israel, Palestina, Siria, Turquía e Irak. Entre las primeras plantas domesticadas aparecen la cebada, el trigo desnudo y el trigo vestido, cereales con metabolismo C_3. En estas especies, la $\Delta^{13}C$ en grano guarda una estrecha correlación con la productividad del cultivo; sobre todo, en condiciones mediterráneas, bajo las cuales la disponibilidad de agua constituye el principal factor que determina la productividad y la $\Delta^{13}C$ de los granos.

Para estimar la producción prehistórica de cereales, tomamos como muestra dos granos de trigo desnudo, procedentes del Neolítico precerámico B (6300 a.C.) de Tell Halula, un yacimiento del Eufrates medio, en Siria. De acuerdo con la práctica arqueológica, los granos se recuperaron por flotación, se lavaron con agua destilada, se trituraron finamente y se determinó el cociente $^{13}C/^{12}C$ mediante espectrometría de masas en muestras de menos de 1 miligramo. A continuación se calculó la $\Delta^{13}C$ de esos granos.

Para establecer la relación entre la $\Delta^{13}C$ de granos y el rendimiento en trigo, recurrimos a la información agronómica de variedades modernas cultivadas en distintos puntos de la cuenca mediterránea. A partir de su $\Delta^{13}C$ inferimos el rendimiento de los granos fósiles. Obtenida esa estimación primaria del rendimiento, abordamos las diferencias entre los tipos de trigo probablemente cultivados en la prehistoria y los trigos modernos, con los que se ha generado el modelo de estimación. También se tuvieron en cuenta las diferencias ambientales más importantes entre el



1. Granos fósiles de trigo recuperados en un yacimiento de los inicios de la agricultura.

Así se evalúa la productividad de la agricultura prehistórica

En la determinación de la productividad, la composición isotópica de carbono se expresó mediante valores de $\delta^{13}C$. Esa magnitud, en tantos por mil, indica la relación entre la concentración de ^{13}C y la de ^{12}C de la muestra y el patrón. Expresado en forma: $\delta^{13}C(‰) = [(R_{muestra}/R_{patrón}) - -1] \times 1000$, y R es el cociente $^{13}C/^{12}C$. Por mor de comparación, se emplearon también patrones secundarios calibrados con un patrón estándar de carbonato, el denominado PDB. La precisión de las medidas de $\delta^{13}C$ fue ±0,1(‰).

La discriminación isotópica del carbono ($\Delta^{13}C$) se calculó a partir de $\delta^{13}C$. En forma: $\Delta^{13}C = (\delta^{13}C_a - \delta^{13}C_p)/(1 + \delta^{13}C_p)$, donde $\delta^{13}C_a$ y $\delta^{13}C_p$ se refieren a la composición isotópica del aire y la planta, respectivamente. Referida a la escala del patrón PDB, el CO_2 de la atmósfera libre, $\delta^{13}C_a$, tiene una desviación actual de aproximadamente –8,0(‰), mientras que en el momento en que los granos de trigo arqueológicos crecieron el valor, inferido a partir de prospecciones de hielo en la Antártida, era de –6,6(‰).

Una vez determinada la $\Delta^{13}C$ de los granos fósiles, el rendimiento se calculó a partir de la relación actual entre la $\Delta^{13}C$ de los granos y la productividad; es decir, con las condiciones agronómicas actuales y trigos modernos. Para los valores obtenidos en las muestras de $\Delta^{13}C$, se obtienen rendimientos de entre 5000 y 6000 kilogramos por hectárea. El rendimiento antiguo se obtuvo multiplicando esas cifras por un factor 0,5, que refleja el menor índice de cosecha (el cociente del peso de los granos y el peso total de la planta) de los trigos prehistóricos frente a las variedades actuales. Para la corrección se empleó información de diferentes variedades de trigo producidas en los últimos 140 años y cultivadas juntas en un clima mediterráneo. Una segunda corrección del rendimiento fue la debida a la menor concentración de CO_2 atmosférico cuando se produjeron los granos fósiles (alrededor de 275 microlitos por litro) frente a las condiciones actuales (alrededor de 350 microlitros por litro); se estableció multiplicando el rendimiento estimado por 0,6, factor de corrección que deriva de previos estudios, que cultivaron una variedad tradicional, de alto porte, bajo un rango de concentraciones de CO_2 atmosférico similar al registrado durante el Holoceno.



2. Vista general de Tell Halula, yacimiento excavado por un equipo conjunto de la Universidad Autónoma de Barcelona y el Museo de Arqueología de Cataluña.



3. Restos vegetales carbonizados incluidos en los niveles de excavación de Tell Halula.

pasado y el presente no reflejadas en la $\Delta^{13}C$ de los granos.

Los rendimientos hallados en este ejemplo, superiores a 1,5 toneladas por hectárea, así como otros publicados con anterioridad por nuestro equipo, son mayores que los alcanzados ahora por la agricultura de secano en esta región de Oriente Medio, hoy semiárida y dominada por la estepa (si bien muy inferiores a los actuales cultivos de regadío).

La elevada productividad alcanzada en Tell Halula sugiere que el ambiente era más húmedo que en la actualidad. Además, la siembra en suelos normalmente húmedos (en ramblas de ríos, por ejemplo) o el barbecho parecen haber sido prácticas corrientes desde los inicios de la agricultura. Por otra parte. se estima que la productividad alcanzada por la recolección de cereales silvestres, actividad previa a la adopción de la agricultura, no superaría las 0,7 toneladas por hectárea. Así pues, la mayor productividad de la agricultura justificaría, al menos en parte, su adopción y posterior expansión.

José Luis Araus
Depto. Biología Vegetal,
Fac. de Biología, Univ. de Barcelona
Gustavo Ariel Slafer
e Ignacio Romagosa
Area Cultivos Extensivos,
Centro UdL-IRTA, Lérida
Ramón Buxó
Museo de Arqueología de Cataluña,
Barcelona

Sergio Rossi, Lorenzo Bramanti, Georgios Tsounis y Josep-Maria Gili

Recuperación del coral rojo

El litoral mediterráneo sufre una paulatina depauperación de las poblaciones de coral rojo (*Corallium rubrum*) y otras especies bentónicas. Un problema provocado por la acción expoliadora directa o por causas indirectas, de origen humano también (mortalidades masivas, empobrecimiento de los hábitats bentónicos y presencia excesiva de escafandristas). Los organismos de los fondos de substrato duro asisten al debilitamiento de su estructura poblacional, la pérdida de densidad y la reducción de la talla de algunas de las especies clave.

¿Cómo salir al paso de ese problema? Una vía obligada es la reimplantación de especies ausentes en lugares donde antaño medraron. Se ha obtenido ya éxito en una experiencia piloto con el coral rojo, organismo muy vulnerable. La implantación de placas de mármol cerca de las colonias madre (poblaciones en estado reproductor) favorece el asentamiento de reclutas, los recién llegados tras un proceso de ovogénesis, liberación y natación que las larvas de esta especie emprenden cada año entre julio y agosto.

Una vez en la placa, puede observarse su evolución e impedir que se asienten otras especies. Por fin, la estructura se traslada allí donde el coral rojo haya desaparecido o esté en regresión. Se ha comprobado que las placas pueden evitar, durante un largo tiempo, la aparición de esponjas perforantes que malogran los esqueletos calcáreos.

Otra opción contrastada consiste en el trasplante directo de colonias adultas, capaces de producir reclutas que repoblarían la zona. Pese a su eficacia comprobada, se trata de una técnica polémica; aducen los críticos que la extracción de coral rojo de un enclave para emplazarlo en otro contribuye a la depauperación de los bancos originales.

1. Población de coral rojo (*Corallium rubrum*) bajo un extraplomo rocoso, a unos 30 metros de profundidad.





2. Pese a su sencillez, la implantación de las placas de mármol debe realizarse con escafandra autónoma.



3. Cada seis meses, las placas se fotografían para seguir la evolución de los reclutas asentados en ellas.



4. Al colocar varias placas cerca de una población reproductora, aumenta la posibilidad de éxito en el reclutamiento, pues las larvas de esta gorgonácea deberán recorrer una distancia corta.



5. Para implantar una colonia entera se utiliza una masilla no tóxica. Se aprovechan las oquedades naturales.

Cambio climático brusco

No sólo en las películas abrasan los campos sequías súbitas y caen de golpe las temperaturas del invierno seis grados. Tan sorprendentes saltos climáticos se han dado antes; a veces, en cuestión de años

Richard B. Alley

La mayor parte de los expertos en el clima coinciden en que no es de temer una verdadera edad del hielo en los próximos decenios. Pero en el pasado se han dado muchas veces bruscas variaciones climáticas de gran intensidad, y podría haberlas de nuevo. Más aún: lo más probable es que sean inevitables. E inevitables serían los problemas que así se le plantearían a la Humanidad. Inesperados momentos de tiempo más templado harían que ciertas regiones fuesen más hospitalarias, pero otras quizá se volverían más tórridas de lo que ya son. Bruscas olas de frío traerían inviernos insoportables; el hielo atascaría importantes rutas de navegación. Las sequías prolongadas convertirían en eriales lo que habían sido fértiles tierras de cultivo. Y como los cambios climáticos que tienen lugar bruscamente persisten con frecuencia durante centurias o incluso milenios, tanto más duras resultarían esas consecuencias. El hundimiento de algunas sociedades antiguas, antes atribuido a fuerzas sociales, económicas y políticas, se achaca ahora en mayor parte a rápidas variaciones del clima.

El espectro del cambio climático brusco ha suscitado investigaciones científicas serias durante más de un decenio, pero sólo recientemente ha captado el interés de economistas y responsables políticos. Junto a esa mayor atención, se experimenta una confusión creciente sobre qué desencadena tales cambios y cuál será el resultado final. Los observadores superficiales podrían suponer que las variaciones rápidas empequeñecerían cualesquiera efectos del calentamiento global inducido por la actividad humana, que sobreviene sólo gradualmente. Pero nuevos indicios apuntan a que el calentamiento global debería preocupar más que nunca: podría abocarnos más deprisa a una variación súbita del clima.

De un extremo al otro

Quizá no se habría descubierto nunca la capacidad del clima de dar bandazos entre estados radicalmente diferentes si no fuera por los testigos que, a principios del decenio de 1990, se extrajeron de la vasta capa helada de Groenlandia. Esos colosales cilindros de hielo —algunos de tres kilómetros de longitud— encierran un archivo climático de considerable legibilidad que abarca los últimos 110.000 años. En ellos se distinguen capas anuales. Se las data por medio de diversos métodos; la composición del hielo indica la temperatura a la que se formó.

Estos trabajos han revelado una dilatada historia de violentas fluctuaciones del clima, en la que largos períodos gélidos han ido alternando con breves temporadas más templadas. La parte central de Groenlandia experimentó sacudidas de frío extremas: hasta seis grados en unos pocos años. Y a la inversa, en apenas diez conoció un calentamiento igual a la mitad del experimentado desde el mínimo del último período glacial: más de una decena de grados. Ese salto, que tuvo lugar hace 11.500 años, viene a ser como si Minneapolis o Moscú adquiriesen de pronto el clima, cálido en comparación, de Atlanta o Madrid.

Los testigos de hielo no sólo revelaron lo que sucedió en Groenlandia, sino que también nos dieron a entender cuál pudo ser la situación en el resto del mundo. Se supuso que aquella subida de diez grados en el norte formó parte de un episodio de calentamiento que afectó a una ancha banda del hemisferio

SLIM FILMS



LAS OSCILACIONES BRUSCAS son un elemento inevitable del clima terrestre.

boreal e intensificó las precipitaciones en esa zona y mucho más allá. En la propia Groenlandia, el espesor de las capas anuales de hielo mostraba que la precipitación de nieve se duplicó en un solo año. El análisis de viejas burbujas de aire apresadas en el hielo corroboró que en otras partes aumentó la humedad. En concreto, las mediciones del metano de las burbujas indicaron que ese gas de los pantanos entró en la atmósfera un 50 por ciento más deprisa durante el calentamiento intenso. El metano debió llegar a la atmósfera casi con toda seguridad cuando las ciénagas se inundaron en los trópicos y se helaron más al norte.

Los testigos contenían otros indicios que han colmado huecos en el conocimiento de cómo fue el medio ambiente en diversas épocas. Así, las capas de hielo que apresaron polvo de Asia indicaron el origen de los vientos dominantes. Debieron ser más flojos durante las épocas cálidas; se llegó a esa conclusión porque en ellas se acumuló en los hielos menos sal marina y cenizas de lejanos volcanes. La lista de indicios de este estilo es larga [*véase* "Testigos de hielo de Groenlandia", por Richard B. Alley y Michael L. Bender; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1998].

En los testigos de hielo de Groenlandia aparecen más de 20 episodios de calentamiento intensos y bruscos. De ordinario, a los centenares o millares de años tras el comienzo de un período cálido, el clima iniciaba un enfriamiento lento, seguido de un enfriamiento rápido a lo largo de un período de tiempo de sólo un siglo. Después, se repetía la pauta, con otro calentamiento durante sólo unos años. En el período de frío más extremado, los témpanos de hielo errantes llegaban muy al sur, hasta las costas de Portugal. No tan profundo debió de ser el empeoramiento del tiempo que expulsó a los vikingos de Groenlandia durante la más reciente ola de frío, la Pequeña Edad del Hielo, que comenzó alrededor del año 1400 d.C. y duró 500 años.

Los bruscos calentamientos y enfriamientos del norte se desarrollaron de manera diferente en otras partes del mundo, aun cuando pudieron haber compartido la misma causa. Las épocas frías y húmedas de Groenlandia se corresponden con circunstancias particularmente frías, secas y ventosas en Europa y Norteamérica; coinciden también con un tiempo más cálido de lo normal en el Atlántico Sur y la Antártida. Se han confeccionado estas historias regionales basándose en los elementos de juicio adicionales encontrados en los hielos de los glaciares de alta montaña, el espesor de los anillos de los árboles y las clases de polen y conchas conservadas en antiguos lodos de fondos de lagos y océanos, entre otras fuentes.

Las pruebas halladas nos han enseñado también que las variaciones súbitas han planteado a los seres humanos situaciones comparables a las provocadas por las variaciones de temperatura. Las épocas frías en el norte han ido de ordinario acompañadas de sequías en el Sahara, Africa e India. Hace unos 5000 años, una sequía brusca transformó el Sahara: un paisaje verde, salpicado de lagos, se convirtió en el abrasador desierto de hoy día. Dos siglos de sequía, hará unos 1100 años, contribuyeron, según parece, al fin de la civilización maya clásica en México y otras partes de Centroamérica. En los tiempos modernos, El Niño y otras anomalías del Pacífico Norte han alterado en ocasiones las configuraciones meteorológicas tanto como para desencadenar sequías inesperadas, como la que creó el *tazón de polvo,* las tempestades de polvo que convirtieron en eriales las grandes llanuras de Estados Unidos durante el decenio de 1930.

El punto sin retorno

Trátese de olas de calor o de frío, o de sequías prolongadas, todos los cambios climáticos bruscos del pasado se debieron esencialmente a la misma razón. En cada caso, una variación gradual de la temperatura o de otra variable física impulsó a algún elemento rector del clima hacia un umbral invisible. En el momento en que cruzó ese umbral, el rector del clima —y con él el clima mismo— saltó de golpe a un estado diferente; permaneció en él mucho tiempo.

Cruzar un umbral climático es como volcar una piragua. Si estamos sentados en una piragua en un lago y nos inclinamos poco a poco hacia un lado, la piragua se irá inclinando también. Estaremos impulsando la piragua hacia un umbral, hacia una posición más allá de la cual zozobrará. Inclinémonos un poco más, y la piragua volcará.

El cruce de umbrales dio por resultado los más extremos saltos climáticos de la historia. Ahora apunta a áreas que causan especial preocupación para el futuro. La explicación más común de los gélidos períodos registrados en los testigos de hielo de Groenlandia los liga a alteraciones anómalas de las corrientes del Atlántico Norte, factor dominante en las configuraciones meteorológicas a largo plazo de esa región.

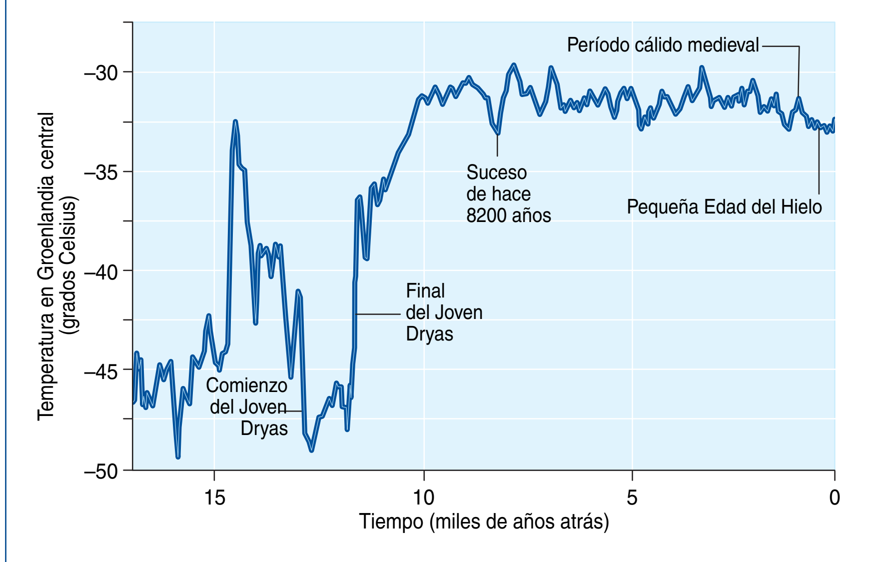
El este de Norteamérica y Europa disfrutan de un clima templado (como el de ahora) cuando las aguas saladas del Atlántico, calentadas por el sol meridional, cruzan el ecuador hacia el norte. Más al norte, durante el invierno, esas aguas saladas que llegan del sur se enfrían y adquieren densidad suficiente para hundir-

Resumen/Sorpresas inevitables

- La mayor parte de las investigaciones acerca del cambio climático y de los debates sobre la política que debería seguirse al respecto se centran en el calentamiento global. Pero otro problema nos amenaza también: el clima ha oscilado bruscamente en el pasado y con toda seguridad volverá a hacerlo.
- Una sequía regional de un verano podría enquistarse, perdurar decenios y destruir las ricas tierras agrícolas de Asia y Norteamérica; en cuestión de decenios, las configuraciones meteorológicas podrían alterarse en Europa de modo que su clima se volviese siberiano.
- No es posible todavía predecir cuándo tendrán lugar alteraciones bruscas de esa especie, pero la mayoría de los climatólogos advierte que el calentamiento global y las actividades humanas quizás estén acelerando la aparición de cambios climáticos súbitos y duraderos.

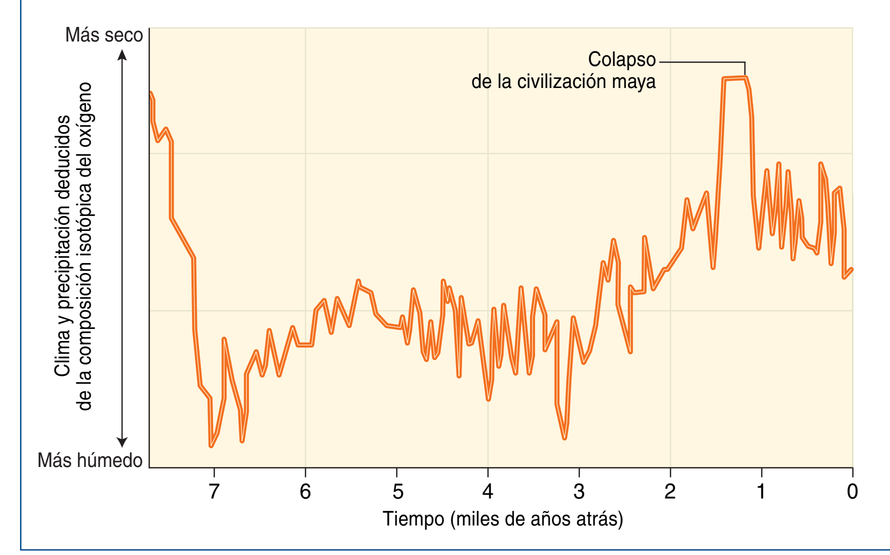
¿EL PASADO COMO PROLOGO?

El cambio climático brusco ha marcado la historia de la Tierra. Los testigos de hielo de Groenlandia revelan que hubo violentas oscilaciones de temperatura (*arriba, izquierda*) que interrumpieron varias veces el calentamiento gradual que empezó a sacar el planeta de la última glaciación, hace unos 18.000 años. Las conchas fósiles que se hallan en los sedimentos de los lagos de la península del Yucatán registran sequías intensas y súbitas (*abajo, izquierda*): una razón entre abundancias de isótopos de oxígeno aumenta de golpe cuando se evapora del lago más agua de la que cae en forma de lluvia. Muchas sociedades han sufrido las consecuencias de las variaciones bruscas (*fotografías*).





Yacimiento vikingo de Groenlandia. Se trata de uno de los asentamientos abandonados al principio de un repentino período de frío, la Pequeña Edad del Hielo.





El dios maya de la lluvia (*estatua en primer término*) no conjuró la sequía a la que ahora se atribuye el colapso de la civilización maya, hace unos 1100 años.

ELIZA JEWETT; FUENTES: M. STUIVER ET AL. Y K. CUFFEY ET AL. (*gráfica superior*) Y D. HODELL ET AL. (*gráfica inferior*) CENTRO NACIONAL DE DATOS GEOFISICOS; RUDY BRUEGGEMANN (*fotografía superior*); FREELANCE CONSULTING SERVICES PTY LTD/CORBIS (*fotografía inferior*)

se al este y oeste de Groenlandia, tras lo cual se trasladan hacia el sur por el fondo del mar. Mientras tanto, a medida que el agua enfriada se hunde, las corrientes cálidas del sur fluyen hacia el norte para ocupar su lugar. El agua que se hunde, por lo tanto, impulsa una circulación “en cinta transportadora” que calienta el norte y enfría el sur.

En los testigos de hielo hallamos indicaciones de que los enfriamientos súbitos se produjeron después de que el Atlántico Norte se hiciera menos salado, tal vez porque los lagos de agua dulce reventaron las paredes de los glaciares y buscaron un camino hacia el mar. Se considera que este tipo de flujo constituye la primera fase de un cruce de umbral: desalinizar el Atlántico Norte puede retardar o detener la cinta transportadora, con el consiguiente cambio climático.

Diluida por el agua procedente de la tierra, el agua marina que venía procedente del sur se haría menos salada y, por consiguiente, menos densa, posiblemente hasta el punto de que se convirtiese en hielo marino antes de que tuviera la oportunidad de hundirse. Con el hundimiento interrumpido y la cinta transportadora detenida, la lluvia y la nieve que caían en el norte no llegaban hasta las profundidades ni se las transportaba lejos, sino que se acumulaban en la superficie del mar. El Atlántico Norte se volvía cada vez

CRUZAR UMBRALES

El calentamiento global altera las condiciones ambientales poco a poco. No obstante, este cambio lento y continuo puede impulsar a los mecanismos que rigen el clima, así las corrientes oceánicas bien establecidas o la distribución de lluvias, hasta un punto crítico tras el cual pasan bruscamente a un estado nuevo. Este salto trae consigo una variación en el clima, con consecuencias en principio peligrosas para personas y sociedades. En cuanto uno de los mecanismos que rigen el clima ha cruzado su umbral, los cambios consiguientes quizá persistan durante milenios. Puede que haya aún que dar con muchos umbrales; he aquí tres de los ya conocidos:

MECANISMO RECTOR DEL CLIMA	CRUCE DE UMBRAL	VARIACION RESULTANTE EN EL CLIMA	CONSECUENCIAS SOCIALES
Las corrientes oceánicas del Atlántico Norte transportan calor hacia el norte desde los trópicos y suavizan así los inviernos de Europa Occidental.	El enfriamiento de las aguas superficiales en el norte frena la velocidad de esas corrientes, quizá hasta detenerlas del todo.	Las temperaturas descienden mucho en la región; el clima de Europa y el este de los EE.UU. se vuelve parecido al de Alaska.	La agricultura padece en regiones de todo el mundo y rutas clave de navegación quedan obstruidas por los hielos.
El agua de lluvia que las plantas reciclan (la absorben sus raíces y la devuelven al aire con la evapotranspiración) proporciona gran parte de las precipitaciones en cinturones cerealistas.	Una sequía no muy grave marchita o mata el tapiz vegetal y el agua reciclada desaparece; un círculo vicioso refuerza la desecación.	Una sequía que no debería haber tenido grandes consecuencias se refuerza y prolonga hasta convertirse en una sequía rigurosa.	La tierra seca ya no puede dar cosechas; el hambre se cierne sobre quienes no pueden adquirir el grano aún existente en el mercado mundial.
Las corrientes del océano Pacífico determinan las grandes pautas de la distribución de la temperatura en la superficie marina, que a su vez controlan las características regionales del tiempo.	Ciertos fenómenos naturales, como El Niño, producen sutiles cambios en las temperaturas de la superficie del mar, pero todavía no se sabe por qué.	La meteorología de los continentes adyacentes cambia; se desencadenan fuertes tempestades o sequías donde no suele haberlas.	Ciertas tierras de cultivo se secan mientras otros lugares sufren duras tempestades.

menos salado. Al mantenerse entonces parada la cinta transportadora, el clima acabó por parecerse en los continentes al de Siberia.

Un calentamiento que congela

Han pasado ocho mil años desde el último de los mayores azotes de frío del Atlántico Norte. ¿No será que los seres humanos estamos "inclinándonos" en la dirección adecuada para evitar el vuelco de la piragua climática? Tal vez, pero la mayoría de los expertos sospechan, muy al contrario, que estamos balanceando la piragua al cambiar tantos aspectos de nuestro mundo tan deprisa. Inquietan sobre todo los aumentos inducidos por la actividad humana en las concentraciones atmosféricas de gases de invernadero, que están fomentando el calentamiento global.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático, patrocinado por las Naciones Unidas, ha predicho que la temperatura media global subirá de 1,5 a 4,5 ºC en los próximos 100 años. Muchos modelos informáticos que concuerdan con esta estima también predicen un frenado de la cinta transportadora del Atlántico Norte. (Por paradójico que pueda parecer, el calentamiento global podría conducir a un enfriamiento súbito de muchos grados.) Las incertidumbres abundan, y aunque no se considera creíble una nueva edad del hielo, los cambios resultantes quizá serían bastante mayores que los experimentados durante la Pequeña Edad del Hielo, en la que el Támesis se congelaba y los glaciares descendían por los Alpes.

Tal vez, más que por las olas de frío en el norte, debamos preocuparnos por los efectos adversos que seguramente azotarían a otras partes del mundo al mismo tiempo. Los registros climáticos de las amplias zonas de Africa y Asia que se benefician de una estación de fuertes monzones señalan que estas regiones han sufrido pronunciadas sequías siempre que el Atlántico Norte ha estado más frío que las tierras que baña. Incluso el enfriamiento debido a una cinta transportadora más lenta podría bastar para que hubiese sequía. Con miles de millones de personas dependiendo de que los monzones rieguen las cosechas, una sequía de orden menor podría llevar a una hambruna generalizada.

Futuros enfriamientos y aportaciones de agua dulce al Atlántico Norte dificultarían la vida incluso para los que viven fuera de un frío o una sequía extremados. La inquietud por la magnitud de las repercusiones espoleó al gobierno norteamericano a solicitar a la Red Mundial de los Negocios, una entidad privada, que evaluara las consecuencias de un paro total de la cinta transportadora del Atlántico Norte. Buena parte de los científicos, incluido el autor, creen que una disminución moderada de su velocidad resulta mucho más probable que una detención total; en cualquier caso, la gravedad del peor de los casos hace que merezca la pena considerarlo.

"Las tensiones", afirma el informe de la Red Mundial de los Negocios, "crecerían en todo el mundo... Las naciones con los medios suficientes levantarían fortificaciones virtuales en sus fronteras y así preservarían sus recursos para sí mismas. Las naciones menos afortunadas... se enzarzarían quizás en luchas para acceder a los alimentos, al agua potable o a la energía."

Inundaciones y sequías

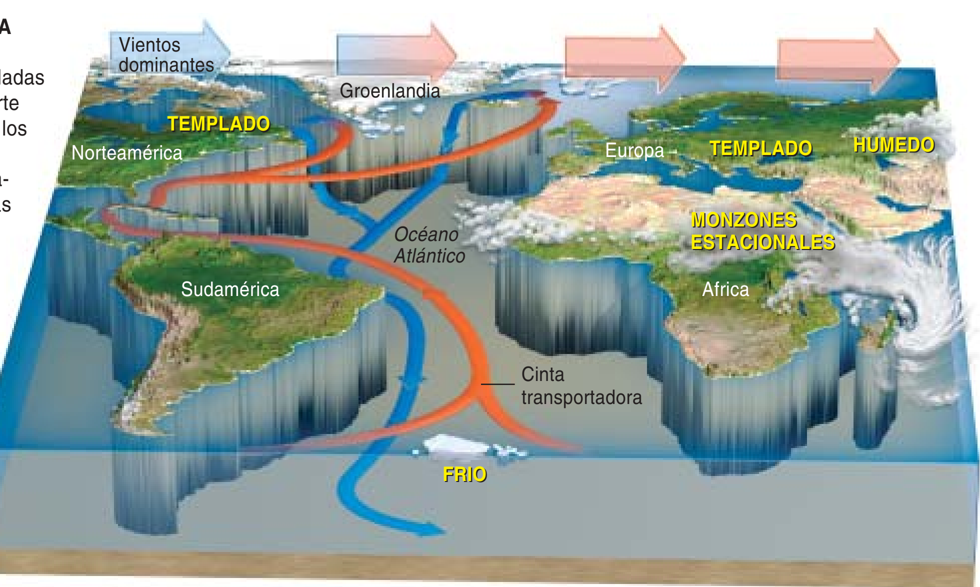
Aun cuando la cinta transportadora del Atlántico Norte no perdiese velocidad, el calentamiento global podría ocasionar inquietantes cruces de umbrales en otras partes. Las grandes franjas de producción cerealista que se extienden por el interior de los continentes a latitudes medias corren el riesgo de sufrir sequías prolongadas. La mayor parte de los modelos climáticos predice que en esas zonas habrá mayores sequías estivales a medida que las temperaturas medias globales suban, pase lo que pase en el Atlántico Norte. Las mismas predicciones apuntan a que el calentamiento inducido por el

CUANDO AL DERRETIRSE EL HIELO SE CREA UNA OLA DE FRIO

Mientras el calentamiento global sigue elevando las temperaturas, muchos científicos temen que grandes volúmenes de agua dulce, procedentes de la fusión de la capa de hielo groenlandesa y de otras heladas masas de tierra nórdicas, pudieran obstruir la “cinta transportadora” del Atlántico Norte, un sistema de corrientes oceánicas que aporta calor a Europa e influye en el clima de otras partes del mundo. La detención de la cinta —o incluso una ralentización apreciable— enfriaría la región del Atlántico Norte, aunque las temperaturas globales continuasen subiendo. Casi con seguridad, se producirían otros cambios bruscos de clima.

CINTA TRANSPORTADORA EN MARCHA

Las corrientes oceánicas saladas (*rojo*) que fluyen hacia el norte desde los trópicos calientan los vientos dominantes (*flechas grandes*) mientras soplan hacia el este, hacia Europa. Las corrientes que transportan calor, ya densas, se adensan todavía más al ceder calor a la atmósfera. Al final, en las proximidades de Groenlandia, el agua fría y salada es tan densa, que se hunde. Emigra entonces hacia el sur a lo largo del fondo del mar (*azul*), dejando un vacío que atrae más agua cálida del sur.

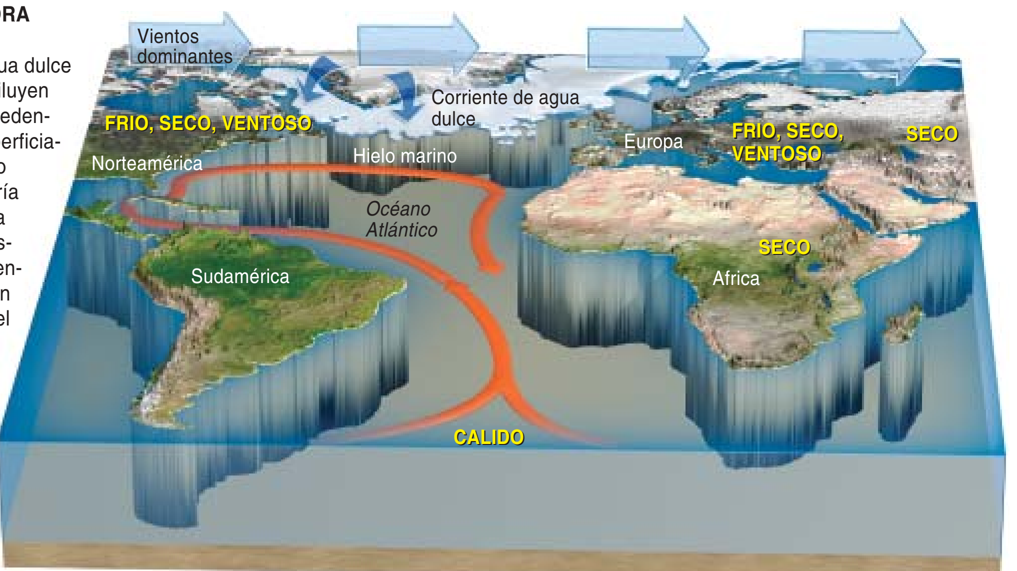


CLIMA RESULTANTE

Cuando la cinta transportadora del Atlántico Norte está en marcha, unas condiciones templadas, con inviernos no muy fríos, dan lugar a una rica producción agrícola en Europa y Norteamérica. Los monzones estacionales favorecen las cosechas en grandes zonas de Africa y el Extremo Oriente. Asia Central es húmeda, y la Antártida y el Atlántico Sur, fríos.

CINTA TRANSPORTADORA PARADA

Al penetrar demasiada agua dulce en el Atlántico Norte, se diluyen las corrientes salinas procedentes del sur. Las aguas superficiales ya no se adensan tanto como para hundirse, por fría que esté el agua, y la cinta transportadora va más despacio o se detiene. Los vientos dominantes transportan ahora aire muy frío hacia el este (*flechas grandes*). Este frío durará decenas de años, hasta que las aguas meridionales se vuelvan tan saladas que predominen sobre las aguas más dulces del norte, afluyan torrencialmente y pongan de nuevo en marcha la cinta.



CLIMA RESULTANTE

A medida que la cinta va parándose, los inviernos adquieren mayor crudeza en gran parte de Europa y Norteamérica; se resiente la agricultura. Estas regiones, junto con las que dependen de los mozones, sufren sequías, a veces agravadas por vientos más fuertes. El Asia Central se vuelve más seca y en muchas regiones del hemisferio austral las temperaturas son más altas de lo habitual.

DAVID FIERSTEIN

Predicciones difíciles

NO HAY PREDICCIONES FIDEDIGNAS de cambios climáticos bruscos, ni es de esperar que las haya en el próximo futuro. Los cambios rápidos son, de por sí, más difíciles de predecir que el calentamiento global o cualquier otro proceso gradual. La propia naturaleza del cambio brusco supone uno de los mayores obstáculos. Se produce una variación rápida cuando un impulso lento pero constante, como el calentamiento global, impulsa un componente crucial del sistema climático más allá de un punto sin fácil retorno. El cruce de ese umbral desencadena un salto brusco a un nuevo estado. Puede compararse con una excesiva inclinación que de pronto vuelca una piragua. Saber exactamente hasta qué punto podemos inclinarla sin volcarla es casi imposible, especialmente cuando el viento y las olas la agitan. De manera análoga, resulta dificilísimo descubrir cuándo algún aspecto del clima se está acercando a un umbral crítico.



EQUILIBRIOS: La Tierra suele mantener un mismo clima durante milenios, si no intervalos más largos incluso. Después, en un momento casi imposible de predecir, algunos aspectos del sistema climático se inclinan demasiado hacia un lado y las condiciones globales se precipitan hacia un estado completamente diferente.

Los investigadores han intentado desentrañar los factores que operan en la vecindad de un punto crítico mediante modelos informáticos. Aunque gracias a esos trabajos se sabe mucho más acerca de qué balancea la piragua del clima, todavía abundan los puntos obscuros. Para determinar la exactitud con que los modelos informáticos predirán el cambio climático, se comprueba si simulan bien los cambios reales ocurridos en el pasado. Muchos modelos aciertan con los tipos básicos de anomalías ya ocurridas; reproducen de forma fidedigna las olas de frío, las sequías o las inundaciones en los lugares y épocas que han quedado registrados en las capas anuales de hielo y sedimentos. Algunos incluso reproducen los cambios en las trayectorias de borrascas, configuraciones de vientos, precipitaciones estacionales y otros detalles de menor alcance.

Pero aunque los modelos captan bien la naturaleza general del cambio climático, hay pormenores muy importantes que se les escapan. En particular, los cambios súbitos del pasado han sido por lo general mayores y más extensos de lo que indican los modelos. Subestiman éstos la cantidad de humedad perdida en el Sahara a lo largo de los últimos millares de años, por ejemplo. También parecen tener dificultad en simular el gran calentamiento de las regiones polares durante la época de los dinosaurios y el frío extremo en la plenitud de la última glaciación.

La razón más sencilla que pueda darse de estos fallos estriba en la sensibilidad de modelos menor que la del clima, quizá porque omiten realimentaciones y reacciones clave. También puede que se hayan pasado por alto algunos umbrales. Localizarlos resultaría provechoso; pero a lo peor nos descubrirían más posibilidades conducentes a cambios climáticos. Si se es optimista, puede pensarse que nos descubrirían que la probabilidad de un cambio brusco resulta menor de lo que se sospecha o que unos cambios podrían compensar otros.

efecto de invernadero incrementará las lluvias en todas partes, posiblemente en forma de borrascas más intensas e inundaciones. En cualquier caso, no es de esperar que esos sucesos, aunque en sí mismos representen problemas importantes, compensen las sequías.

La desecación estival podría hacer que una sequía no muy grave empeorase y persistiese durante decenios o más. Esta transición tendría lugar como consecuencia de la vulnerabilidad de los cinturones cerealistas. Dependen éstos más de la lluvia que las plantas de la región reciclan que de la nueva humedad aportada desde otros lugares. Las raíces de las plantas absorben agua que de otra manera penetraría en el suelo, se incorporaría a las corrientes de agua y acabaría en el mar. Parte de esa agua vuelve después al aire por evapotranspiración. Cuando la zona empieza a sufrir veranos más secos, sin embargo, las plantas se secan e incluso mueren; devolverán menos agua al aire. El umbral se cruza cuando la población vegetal se reduce hasta el punto de que la lluvia reciclada escasea demasiado para mantenerla. Al llegar a ese punto mueren más plantas y aún llueve menos. Se cierra un círculo vicioso como el que convirtió el Sahara en un desierto hace 5000 años. No ha mostrado signos de reverdecer desde entonces.

Se teme que queden por identificar muchos de los umbrales cuyo cruce altera los climas regionales. Ese vacío en el conocimiento es preocupante, porque podríamos estar fomentando el desequilibrio climático. No se recomienda bailar en una piragua, pero bailamos: sustituimos los bosques por tierras de cultivo, y aumentamos la cantidad de luz que la Tierra refleja; extraemos agua del suelo, y alteramos la cantidad de agua que los ríos transportan hasta el océano; cambiamos la cantidad de gases traza y partículas en la atmósfera, y modificamos las características de las nubes y la lluvia, y no sólo de las nubes y la lluvia.

Frente al futuro

Las consecuencias negativas de un cambio sustancial del clima se pueden mitigar si el cambio se produce gradualmente o estamos preparados. Los agricultores que esperan una sequía pueden perforar pozos, plantar cultivos menos dependientes del agua o trasladarse a otro lugar. Pero un cambio inesperado quizá sea devastador. Un año seco arruinará o condenará al hambre sólo a los cam-

MATT COLLINS

pesinos más inermes, pero los daños irán a peor cuanto más larga sea la sequía, especialmente si no hubo tiempo para prepararse. Por desgracia, apenas si se sabe predecir cuándo tendrá lugar un cambio climático brusco y cuál será su naturaleza.

Pese a las enormes consecuencias que una brusca transformación del clima podría tener, la investigación y las políticas asociadas al clima se han dirigido sobre todo a las variaciones graduales. Apenas si se ha pensado en otro paliativo que la reducción de las emisiones de carbono, encaminada a frenar la subida gradual de las temperaturas mundiales. Aunque es muy posible que de esa forma se limitaría la inestabilidad del clima, se debería también pensar en evitar los cambios bruscos. Al respecto, hay dos posturas contrapuestas. Una, ignorar por completo las perspectivas y desear que nada suceda o que, si sucede, podamos hacerle frente; la actitud del "*nunca pasa nada*" hundió el *Titanic,* pero muchos otros buques han cruzado el Atlántico Norte, sin mayor preparación, sanos y salvos. La otra, cambiar de verdad nuestro comportamiento de manera que los efectos derivados de la acción humana sobre el clima se mantengan lo suficientemente pequeños como para que resulte menos probable una variación catastrófica. Frenar el calentamiento global sería un primer paso en la dirección correcta. Ulteriores investigaciones sobre umbrales climáticos y su vulnerabilidad a las actividades humanas alumbrarían más actuaciones útiles.

Una tercera estrategia reforzaría la capacidad de afrontar un cambio climático súbito antes de que la próxima sorpresa se nos eche encima, como ha sugerido el Consejo Nacional de Investigación de los EE.UU. Un informe de esta institución recuerda que algunas sociedades que nos precedieron sólo se flexionaron al producirse el cambio climático; otras, en cambio, se quebraron. Los colonos vikingos de Groenlandia abandonaron sus asentamientos cuando la Pequeña Edad del Hielo volvió miserable o insostenible su vida allí; en cambio, sus vecinos, los inuit, o esquimales, de Thule, sobrevivieron sin mudarse. No nos vendría mal saber qué va de doblarse a romperse. Cabría elaborar planes, a un coste bajo o nulo, que ayudasen a superar las dificultades si se produjera una crisis, plantar árboles ahora, digamos, que conserven el suelo durante la próxima sequía ventosa, o acordar ya quién dispondrá de qué fuentes cuando falte el agua.

De momento, parece que seguiremos balanceando la piragua. Ciertos aspectos del clima se acercarán más a umbrales que podrían desencadenar variaciones violentas. Que llegasen a cruzarlos, no crearía una nueva edad del hielo, pero nos plantearía graves problemas, a nosotros y a otros seres. Vale la pena meditar sobre cómo podrían las sociedades incrementar su resistencia a las consecuencias potenciales de una brusca variación, o incluso cómo podríamos dejar de balancear la piragua del clima.

El autor

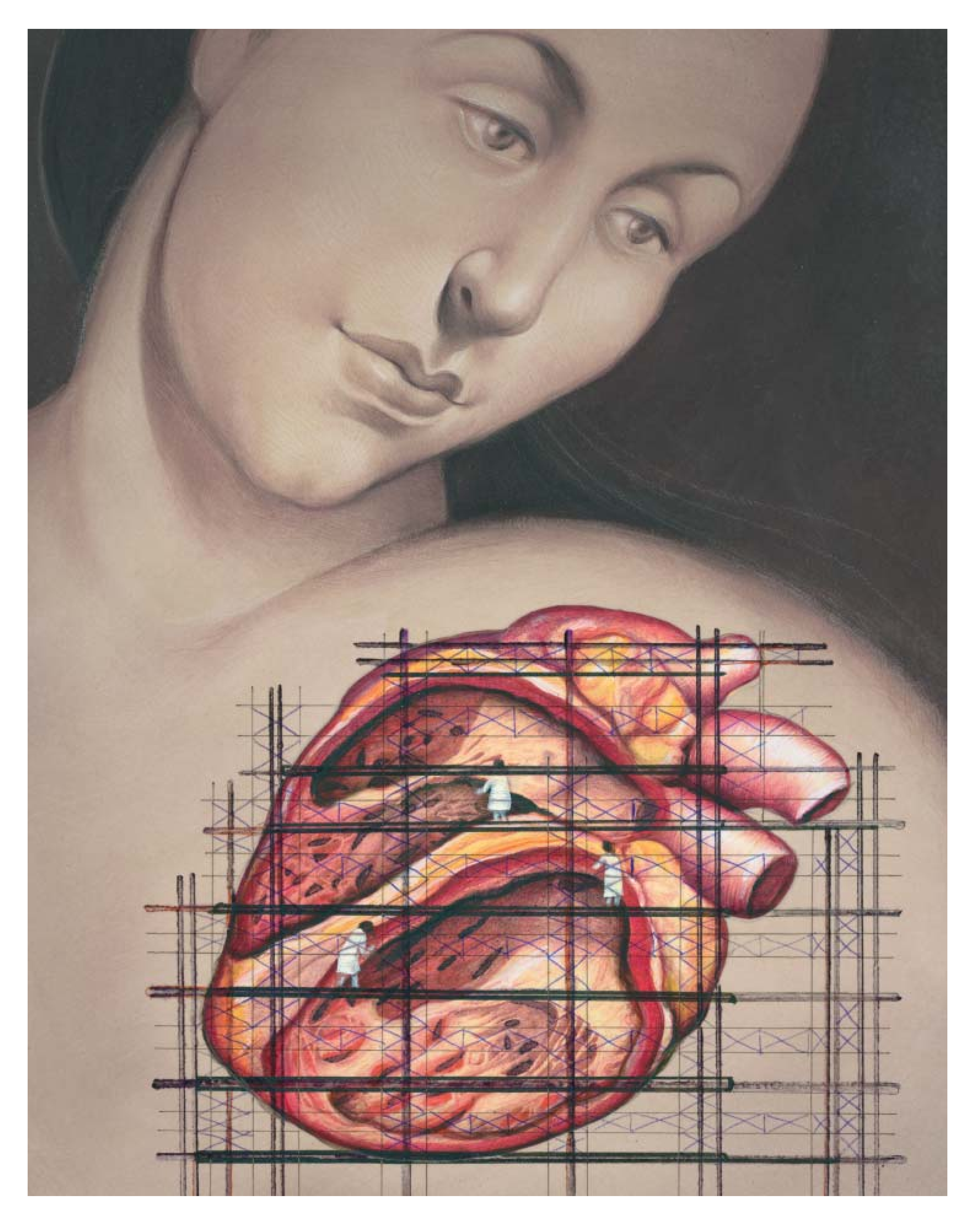
Richard B. Alley es profesor de ciencias geofísicas en la Universidad estatal de Pennsylvania y miembro del Centro de Ciencias del Sistema Terrestre de la misma institución. Ha pasado tres temporadas de trabajo de campo en la Antártida y cinco en Groenlandia.

Bibliografía complementaria

GLOBAL CLIMATE IMPACTS OF A COLLAPSE OF THE ATLANTIC THERMOHALINE CIRCULATION. Michael Vellinga y Richard A. Wood en *Climatic Change*, vol. 54, n.º 3, págs. 251-267, agosto 2002.

RAPID CLIMATE CHANGE. Spencer Weart en *The Discovery of Global Warming*. Harvard University Press, 2003.

AN ABRUPT CLIMATE CHANGE SCENARIO AND ITS IMPLICATIONS FOR THE UNITED STATES NATIONAL SECURITY. Peter Schwarz y Doug Randall. Octubre 2003. Accesible en www.gbn-org/ArticleDisplayServiet.srv?aid=26231.



Injertos para el corazón

Expertos de varios campos colaboran en la incipiente ingeniería tisular. Están a punto de alcanzar uno de sus principales objetivos: construir un parche vivo para el corazón humano

Smadar Cohen y Jonathan Leor

Al corazón roto por amor lo cura el tiempo, pero la lesión del músculo cardíaco causada por un infarto empeora de forma progresiva. A diferencia del tejido hepático o del dérmico, el tejido cardíaco no se regenera. La zona dañada por una crisis cardíaca pierde contractilidad y muere.

Al interferir en las contracciones sincrónicas del músculo cardíaco normal, la cicatriz, o infarto, aumenta la exigencia funcional que recae sobre las zonas sanas del músculo; ello conduce a una mayor muerte celular y a la deformación de la pared cardíaca. En pocos meses, este proceso de deterioro puede llegar a doblar el tamaño de un infarto.

Merced a los tratamientos médicos actuales, un número cada vez mayor de pacientes sobreviven a las crisis cardíacas. No obstante, al menos un tercio de éstos sufren el debilitamiento crónico subsiguiente de sus dañados corazones. Para esta insuficiencia cardíaca sólo existe, hoy por hoy, una curación posible: el trasplante, una alternativa complicada y costosa, limitada por la escasez de donantes. En los EE.UU., por ejemplo, el pasado año se diagnosticaron 500.000 nuevos casos de insuficiencia cardíaca, pero sólo se realizaron alrededor de 2000 trasplantes. El resto de los pacientes ven cómo su calidad de vida se deteriora sin cesar. No llega al 40 por ciento la cifra de quienes sobreviven cinco años a la crisis cardíaca inicial.

Si los médicos pudieran reparar un infarto en el corazón humano, o simplemente frenar su expansión, transformarían millones de vidas. Dadas las circunstancias, obtener un parche de tejido cardíaco vivo se ha convertido en uno de los objetivos más urgentes y ambiciosos de la ingeniería tisular. Las fibras del músculo cardíaco deben organizarse en paralelo y establecer luego conexiones físicas y nerviosas, encargadas de conducir las señales eléctricas que permitan a estas fibras contraerse de forma sincronizada. La piel y el cartílago entrañan menor complejidad; además, puesto que no requieren vascularización interna resulta más simple conseguir su cultivo en el laboratorio. Para estructuras de mayor espesor, como el músculo cardíaco, incorporar el requerido aporte vascular a un injerto (tridimensional) sigue constituyendo uno de los mayores obstáculos.

Hace sólo 15 años, la idea de desarrollar tejidos vivos fuera del cuerpo se consideraba poco menos que extravagante. Desde entonces, los biólogos celulares y los ingenieros de materiales han aportado nuevos conocimientos y técnicas para afrontar este reto. Se han logrado progresos sustanciales. En nuestro trabajo en colaboración, por ejemplo, los principios ingenieriles desempeñaron un papel decisivo para el desarrollo de un armazón o andamiaje que estimulara el crecimiento de las células cardíacas y de los vasos sanguíneos, incluso en la zona infartada.

El andamio

El infarto de miocardio, el "ataque de corazón", se produce, por lo general, cuando una de las principales arterias que suministran sangre al ventrículo izquierdo se bloquea debido a un coágulo o cualquier otra obstrucción. Parte del músculo cardíaco, o miocardio, deja de recibir sangre y, por tanto, oxígeno, lo que causa la muerte de las células musculares contrác-

ANITA KUNZ

tiles del corazón (cardiomiocitos) y deja una estela de tejido muerto. El tamaño de este infarto dependerá del tamaño del área que alimentaba la arteria bloqueada.

Dado que los miocitos raras veces se dividen, las células miocárdicas supervivientes no pueden repoblar, mediante su replicación, el área infartada. Las células madre locales, progenitoras de nuevas células en otros tejidos, se muestran elusivas en el corazón; parecen incapaces de curar la lesión por sí mismas. Son los fibroblastos, células sin capacidad de contracción, los que reemplazan gradualmente los miocitos muertos. Puede que los miocitos sanos adyacentes al área infartada mueran también, causando la consiguiente expansión del infarto. En este proceso de remodelación, la pared del ventrículo se adelgaza en el área infartada y, por fin, se distiende o incluso llega a romperse.

En los últimos años, los investigadores han intentado regenerar el tejido miocárdico en la zona infartada mediante el trasplante de células madre procedentes de otros tejidos, como la médula ósea o el músculo esquelético. Se esperaba que estas células se adaptaran a su nuevo entorno y comenzaran a producir nuevos cardiomiocitos o, al menos, ayudaran a estimular cualquier capacidad regenerativa que el propio corazón pudiera poseer. Para nuestro infortunio, esta técnica ofrece resultados escasos. En su mayoría, las células madre no sobreviven al trasplante; aquellas que lo consiguen tienden a congregarse en los bordes del infarto, sin lograr establecer contacto físico con el tejido sano adyacente ni conducir señales eléctricas que permitan a las células cardíacas sincronizar sus contracciones.

Si las células implantadas no consiguen desarrollarse en el infarto es, sobre todo, porque el área dañada carece de la infraestructura natural que normalmente sustenta las células vivas. El tejido sano cuenta con una matriz extracelular que contiene proteínas estructurales (colágeno) y azúcares complejos o polisacáridos (heparán sulfato); dicha matriz genera sustancias químicas (señalizadores) que estimulan el crecimiento y a la vez ofrece soporte físico a las células.

Conscientes de la importancia de la matriz extracelular, los ingenieros tisulares han buscado durante largo tiempo un sustituto que sirviera de plataforma para los tejidos vivos en crecimiento. Ese material formaría una suerte de andamio que sustentaría las células, lo que les permitiría desarrollarse, dividirse y organizarse en un tejido tridimensional, como sucede en la naturaleza. Se resolvería así el problema de las células trasplantadas que emigran de la cicatriz cardíaca. Una vez las células se hubieran establecido en el área infartada y comenzado a secretar su propia matriz extracelular, dicho armazón debería disolverse, dejando atrás sólo tejido sano. Además —y esto es quizá lo que reviste mayor importancia—, el armazón debería permitir o, mejor aún, promover una rápida vascularización en el interior del nuevo tejido. Los vasos sanguíneos que proveen de oxígeno, y retiran los desechos, a todas y cada una de las células resultan esenciales para la supervivencia de éstas una vez que se han trasplantado al huésped vivo.

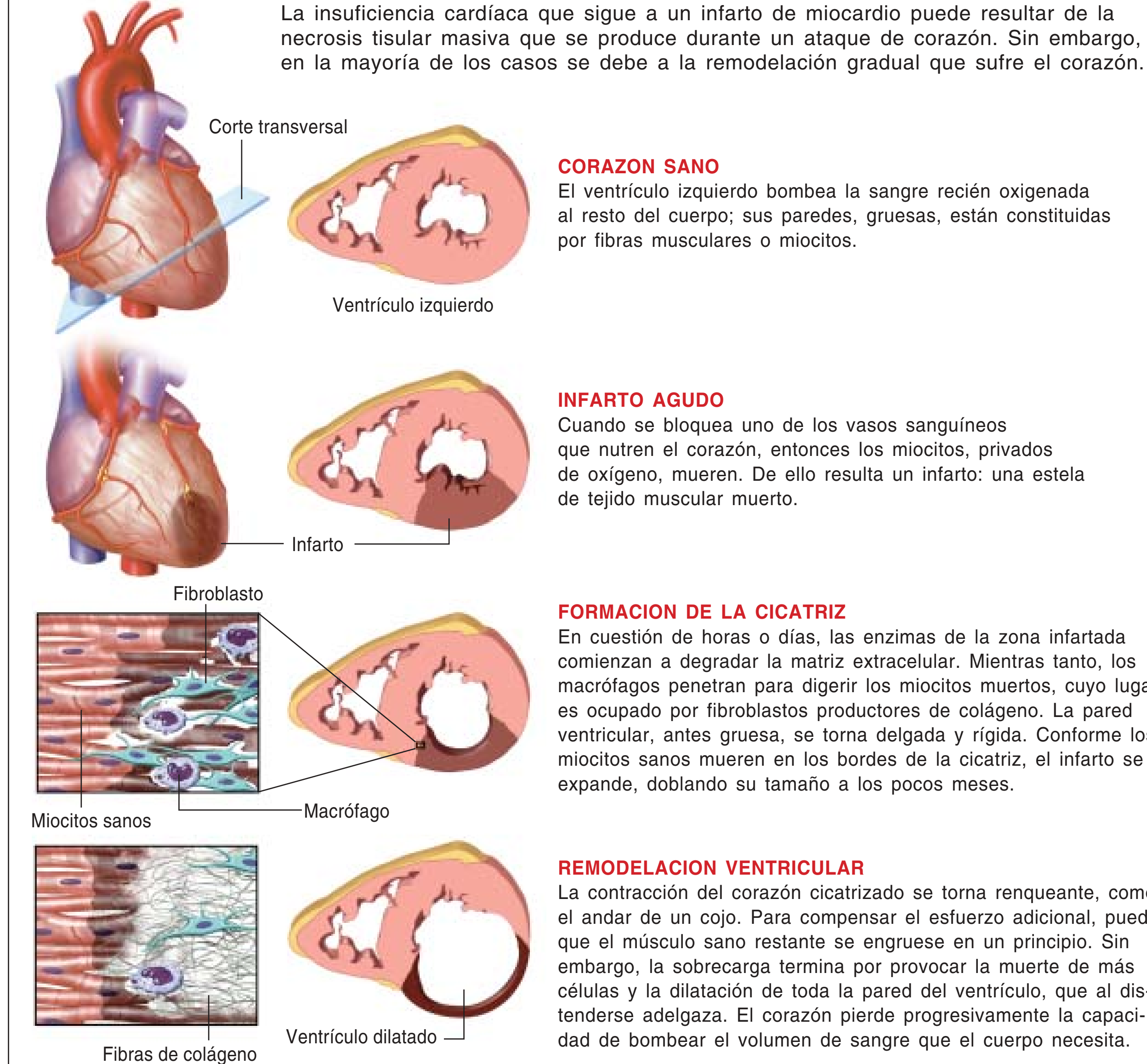
A finales de los ochenta del siglo pasado, uno de los autores (Cohen) trabajaba con Robert Langer, pionero en el campo de la ingeniería tisular [*véase* “Ingeniería de tejidos: urdimbre polimérica”, por Robert Langer y Joseph P. Vacanti; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1999], en su laboratorio del Instituto de Tecnología de Massachusetts. En aquel entonces, muchos desestimaron, por quimérica, la idea de cultivar tejido vivo. Además, nosotros no veníamos de la biología —campo tradicionalmente dedicado al estudio de las células— sino de la ingeniería química. Sin embargo, en aquella época se produjeron notables avances en ambas disciplinas: los biólogos ahondaban en los mecanismos de interacción entre células y materiales, mientras que los ingenieros lograban sintetizar nuevos polímeros. En el transcurso de los veinte años transcurridos, los ingenieros tisulares han experimentado con una gran variedad de materiales, sintéticos y naturales, con el fin de desarrollar una plataforma para que células vivas puedan desarrollarse en un tejido funcional completo.

Entre los materiales sintéticos más comunes se encuentran los poliésteres degradables compuestos de láctidos, de glicólidos o de una combinación de ambos. Si bien ofrecen seguridad suficiente para introducirse en el cuerpo humano, presentan varios inconvenientes. Por una parte, puesto que la mayoría de estos materiales son hidrófobos, las células no se adhieren bien a ellos. Por otra, los armazones construidos con estos polímeros tienden a desmenuzarse más que a degradarse a un ritmo continuado. Además, los subproductos ácidos de su degradación provocan la inflamación local del tejido y afectan a la viabilidad de las células trasplantadas. Los hidrogeles (geles sintéticos de nuevo cuño) no conllevan la mayoría de estos problemas, pero sí una ventaja: su textura guarda semejanza con la matriz extracelular natural. Con todo, carecen de las propiedades químicas que ofrecen las proteínas de dicha matriz, entre las que destaca el colágeno, proveedor de señales funcionales básicas para las células.

En busca de materias primas para el andamiaje, se ha ensayado con el

Resumen/Remendar corazones

- El músculo cardíaco lesionado terminará por causar insuficiencia cardíaca en millones de pacientes que sobrevivieron a un ataque de corazón, a menos que la zona infartada se restaure o sustituya por tejido nuevo.
- El cultivo de un tejido vivo conjuga el conocimiento de la biología sobre el comportamiento celular con la maestría de la ingeniería de materiales.
- Ahora que ya saben cómo estimular *in vivo* la regeneración del músculo cardíaco, los ingenieros tisulares se proponen crear *in vitro* músculo cardíaco contráctil.



TERESE WINSLOW

colágeno, la fibronectina y otras proteínas de la matriz extracelular. Aunque estas biomoléculas sí contienen aminoácidos a los que las células vivas se adhieren fácilmente, no ofrecen suficiente resistencia mecánica para soportar una gran cantidad de células; el colágeno, en particular, es rápidamente consumido por las enzimas del organismo humano. Además, según su fuente, las proteínas pueden provocar rechazo inmunitario, lo que sólo añadiría peligros y privaciones a la vida de pacientes que ya sufren insuficiencia cardíaca.

Por todo ello, decidimos probar con otro tipo de polímeros naturales: los alginatos, compuestos derivados de las algas. Se trata de polisacáridos biocompatibles, lo que significa que no activan el sistema inmunitario del huésped. Existe un alginato que, cuando se disuelve en agua y se expone luego a iones de calcio dotados de carga positiva, sus moléculas se entrecruzan para formar un hidrogel que contiene un 98 por ciento de agua, muestra una consistencia gelatinosa y unas propiedades elásticas similares a las de la matriz extracelular natural.

Mas, si queríamos convertir este hidrogel con alginato en un armazón apto para el trasplante de miocitos, había que darle forma y estructura interna, así como aumentar su resistencia mecánica para que no se deformara bajo el peso de las células sembradas. Con este fin diseñamos una nueva técnica para solidificar el alginato, inspirada en principios ingenieriles.

Comenzamos por verter la solución de alginato en diferentes tipos de moldes, congelándolos luego a través de tres procedimientos distintos, que se diferencian por el gradiente de temperatura que se genera dentro de la solución. Al congelarse, todas las muestras exhibían una estructura de cristales de hielo

INGENIERIA DE UN ARMAZON TISULAR

UN ARMAZON ofrece soporte físico y guía para que las células formen un tejido. Su estructura se basa en una malla de poros interconectados; con un diámetro de al menos 200 micras (el calibre medio de un capilar), éstos permiten que los vasos sanguíneos penetren y las células interaccionen.

Para construir ese andamiaje escogimos el alginato, un derivado de las algas que guarda semejanza química con la matriz extracelular natural. Hubo, no obstante, que desarrollar un método que convirtiera una solución viscosa de alginato y agua en un material sólido, cuya forma (*derecha próxima*) y arquitectura interna (*derecha lejana*) pudieran controlarse.

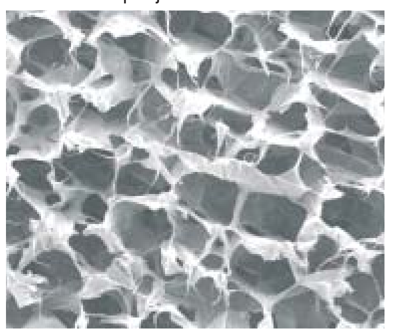
Sabiendo que el agua de nuestro hidrogel de alginato formaría cristales de hielo si se congelaba y que la forma de dichos cristales dependía del método de congelación, ensayamos diferentes técnicas de liofilización (congelación y posterior eliminación del agua mediante sublimación del hielo formado). Obtuvimos así varias estructuras esponjosas de cristales de hielo separados por paredes delgadas de alginato. Tras la sublimación, obtuvimos poros de varias formas, tamaños y orientaciones, reflejo de la velocidad y dirección del crecimiento de los cristales cuando el calor se transfirió del hidrogel al medio refrigerante (*abajo*).



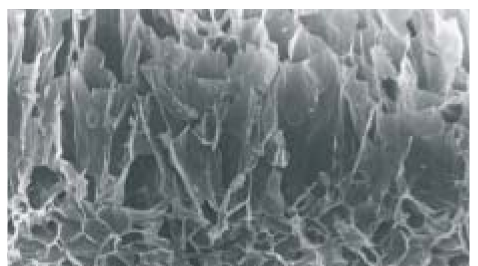
Armazones de alginato



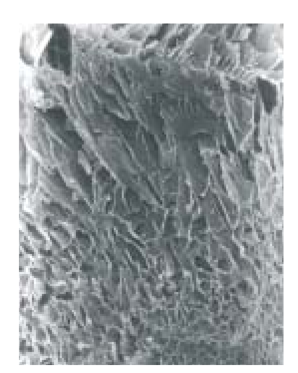
Estructura esponjosa



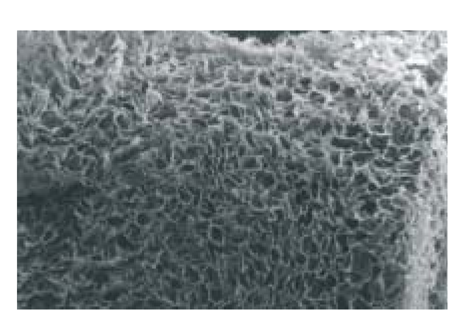
REGIMENES DE CONGELACION



En un baño de aceite a –35 ºC, el hielo se forma más rápidamente en el fondo de la muestra, produciendo poros pequeños, compactos y en interconexión. De mayor tamaño y alargados, los poros de la parte superior siguen la dirección de avance de la congelación.



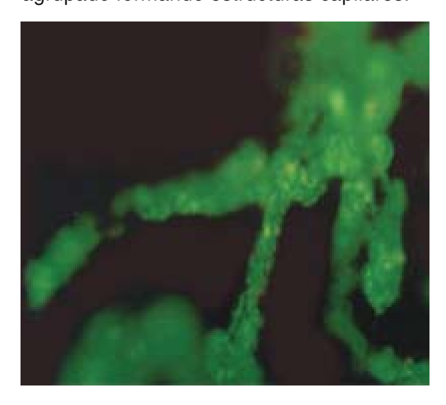
En nitrógeno líquido a –196 ºC, aparece un gradiente de temperatura similar al anterior, de abajo arriba. Las complejas formas y direcciones de los poros cerca de la parte superior de la muestra pueden resultar de la elevada volatilidad del nitrógeno, que origina múltiples frentes de congelación allí donde se produce la transferencia de calor entre el refrigerante y la solución de alginato.



En un congelador a –20 ºC, se guarda una solución de alginato enfriada primero a –10 ºC, calentada luego bruscamente a –2 ºC y, por fin, enfriada de nuevo lentamente a –20 ºC. El incremento brusco de temperatura provocó que el agua liberara su calor y comenzara a cristalizar por toda la muestra al mismo tiempo; así se obtuvieron estos poros uniformes e interconectados.

ARQUITECTURA DE LOS POROS

El control que estas técnicas de congelación ofrecen sobre la arquitectura del "armazón" reviste mayor interés, puesto que la estructura de los poros ejerce una influencia decisiva en la función del tejido que se forma. Los poros alargados, por ejemplo, pueden promover la vascularización: mediante nitrógeno líquido obtuvimos "armazones" con largos canales que luego sembramos con células endoteliales marcadas con fluorescencia (*verde, debajo*); a las dos semanas, las células se habían agrupado formando estructuras capilares.



LILIA SHAPIRO Y SMADAR COHEN *Universidad Ben-Gurion* (*arriba, a la izquierda*); MICHAL SHACHAR, RONIT BASHER Y SMADAR COHEN *Universidad Ben-Gurion* (*arriba, a la derecha*); DE S. ZMORA ET AL. EN *BIOMATERIALS*, VOL. 23; 2002, CON PERMISO DE ELSEVIER Y SHARON ZMORA Y SMADAR COHEN *Universidad Ben-Gurion* (*izquierda*); SIGALIT AMITAY-SHAPRUT Y SMADAR COHEN *Universidad Ben-Gurion* (*abajo, a la derecha*)

separados por paredes de alginato. Tras eliminar dichos cristales mediante sublimación, obtuvimos un armazón esponjoso, cuyos pequeños poros reflejaban la forma de los cristales. Variando el método de congelación se puede controlar la densidad, el tamaño y la dirección de los poros, así como el grado de interconexión.

Las interconexiones entre los poros revisten sumo interés para la viabilidad del armazón: permiten que las células vivas, una vez "sembradas", pasen con facilidad a través de su estructura. La circulación libre y continua de nutrientes y desechos hacia y desde las células en cultivo resulta también vital. El grado de interconexión entre los poros influye de forma crítica en la capacidad de los vasos sanguíneos neoformados para penetrar en el tejido en formación, una vez que se transfiere al huésped. Por último, la arquitectura interna de este armazón, que recuerda una esponja o un panal de abejas, favorece la resistencia mecánica; aunque los poros constituyen más del 90 por ciento de su volumen, el andamiaje resiste una presión externa considerable.

Logramos, pues, crear un armazón con la forma y estructura deseadas —que burlara el sistema inmunitario—, confeccionado con un material natural, libre de sustancias tóxicas, con buena durabilidad mecánica y que se desintegraba dentro del cuerpo en un tiempo razonable. Sin embargo, quedaba por ver si las células vivas encontrarían en nuestro armazón un buen sustituto de la matriz extracelular natural.

Cultivo del tejido

Antes de implantar nuestros andamiajes en animales de laboratorio, quisimos observar la adaptación *in vitro* de las células cardíacas al alginato, es decir, fuera del organismo. Extrajimos células del corazón de embriones de ratas —que, a diferencia de los cardiomiocitos maduros, conservan aún la capacidad de dividirse— y las suspendimos en un medio líquido con nutrientes. A continuación, inyectamos esta suspensión en armazones redondos, de seis milímetros de diámetro por uno de altura. Bastó una centrifugación moderada para que las células penetraran rápidamente en los poros del andamiaje, en el que se distribuyeron uniformemente en menos de 10 minutos.



1. ARMAZON "SEMBRADO" CON CELULAS. Dos meses después de implantarse en el corazón de una rata, aparece integrado en el área infartada. Vasos sanguíneos locales penetran por todo el injerto; sustentan así células cardíacas maduras dentro del armazón y previenen la expansión del infarto.

Para preservar la viabilidad de estas células, tan sensibles a la falta de oxígeno, el proceso debía realizarse en el menor tiempo posible. Puesto que adoptan una distribución homogénea, puede emplazarse un gran número de células en el interior del armazón. Obtuvimos así estructuras con una densidad de 10^8 células por centímetro cúbico, similar a la del tejido cardíaco maduro.

Los armazones "sembrados" con células se transfirieron a un "biorreactor", una incubadora especial que mantiene la humedad y atmósfera adecuadas mientras un medio con nutrientes circula continuamente, por dentro y alrededor de los armazones. Seguíamos el control del metabolismo de las células; transcurridas sólo 48 horas, detectamos miocitos que se contraían. A los siete días, llegó el momento de dar el siguiente paso: trasplantar los armazones en corazones vivos.

Anestesiamos y operamos ratas adultas a las que se había provocado, siete días antes, un infarto de miocardio en el ventrículo izquierdo. En cada individuo, una cicatriz pálida e inerte revelaba la zona lesionada. Colocamos los andamiajes "sembrados" con células directamente en el interior de los infartos, cerramos la incisión quirúrgica y nos pusimos a esperar.

Al cabo de dos meses, observamos el corazón de las ratas operadas. Lo que hallamos nos dejó atónitos: en los injertos habían proliferado masivamente nuevos vasos sanguíneos procedentes del tejido cardíaco sano. Los microtrasplantes cardíacos obtenidos mediante ingeniería tisular se habían integrado con éxito en el tejido de la cicatriz. Los andamiajes de alginato habían comenzado a disolverse y en su lugar había aparecido matriz extracelular. Las células cardíacas embrionarias se habían transformado en fibras musculares maduras, algunas de ellas organizadas ya en una estructura paralela, similar a la del tejido cardíaco natural. Observamos también conexiones mecánicas y sinapsis eléctricas entre las fibras musculares, necesarias para la contracción y la conducción de señales nerviosas.

Antes de emprender los trasplantes, habíamos medido la función cardíaca de las ratas mediante ecocardiografía. Hicimos lo mismo con un grupo control de ratas con infarto a las que se realizó una falsa intervención, sin trasplante. Dos meses más tarde volvimos a realizar un ecocardiograma a todas las ratas. El grupo control mostraba la imagen típica del deterioro cardíaco: dilatación del ventrículo izquierdo y pérdida de la función cardíaca. Las ratas trasplantadas, en cambio, presentaban los mismos resultados ecocardiográficos que habían mostrado inmediatamente tras sufrir el infarto: el tamaño del ventrículo izquierdo y el grosor de sus paredes, así como la función cardíaca, apenas se habían modificado.

Habíamos alcanzado, pues, uno de los objetivos iniciales de la investigación: proteger un corazón que había sufrido un infarto y prevenir el posterior deterioro que habría conducido a una insuficiencia cardíaca. Sin embargo, muchas cuestiones siguen abiertas. No está claro, por ejemplo, el mecanismo que protege el músculo cardíaco —el tejido trasplantado todavía no participaba en la contracción cardíaca. Parece que el injerto logra prevenir la remo-



2. MICROESFERAS que se incorporan a lo largo y ancho del armazón, mezclándolas con la solución de alginato antes de liofilizarla. Al liberar continuamente factores de crecimiento, estas estructuras de sólo tres micras de diámetro aceleran la formación de nuevos vasos, sin interponerse en su camino.

ANAT PERETS Y SMADAR COHEN *Universidad Ben-Gurion*

delación del corazón porque evita el crecimiento del infarto y engruesa (artificialmente) la pared del corazón en el área infartada.

En nuestra opinión, otro factor contribuye también al freno del deterioro cardíaco: la recuperación de la vascularización en el infarto. Los vasos neoformados eran más numerosos y de mayor calibre cuando implantamos armazones poblados de células; sin embargo, hallamos —no sin sorpresa— que los armazones sin células también estimulaban el crecimiento de nuevos vasos en el área infartada.

El andamiaje de alginato podría estimular el desarrollo de vasos sanguíneos simplemente ofreciéndoles soporte cuando penetran en el área dañada. Sospechamos también que el propio material puede ayudar a reclutar células madre que contribuyan a la regeneración, puesto que la estructura química del alginato guarda semejanza con la del heparán sulfato, un polisacárido fundamental de la matriz extracelular natural. En fecha reciente nos dispusimos a validar esta hipótesis. Para ello inyectamos un hidrogel con alginato directamente en el infarto de las ratas. Observamos que, incluso en forma de hidrogel, el alginato preserva la estructura y la función del ventrículo, operando aparentemente como un sustituto de la matriz extracelular y promoviendo así la angiogénesis.

Para fabricar el injerto necesitamos, además del armazón, células cardíacas aptas para el trasplante en humanos. Dado que no se replican, las células maduras del corazón del propio paciente quedan descartadas. Entre las posibles células —de donante— que pueden estimularse para convertirse en cardiomiocitos se incluyen las células madre embrionarias y las células madre "adultas" procedentes de la médula ósea o de la sangre del cordón umbilical. No obstante, el sistema inmunitario del paciente consideraría extraña cualquier célula del donante, lo que haría necesario el uso de fármacos inmunosupresores. Por tanto, para evitar el rechazo inmunitario, sería preferible recurrir a células autólogas —procedentes del propio paciente. Podrían utilizarse células madre y precursoras derivadas de la médula ósea, de los tejidos muscular o adiposo, así como células madre embrionarias creadas a partir de las células del paciente mediante clonación terapéutica; incluso podrían aislarse las propias células madre cardíacas locales.

Hacia la reparación cardíaca

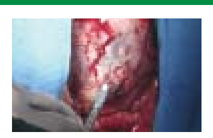
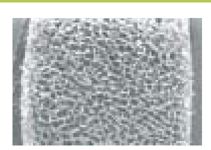
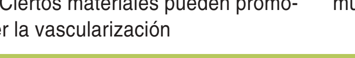
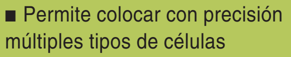
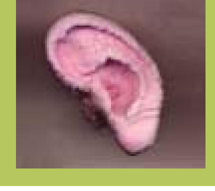
Nuestros hallazgos resultan esperanzadores. Sugieren varias formas de aplicar los armazones de alginato en la protección y regeneración de corazones humanos infartados. Dentro de unos tres años, tales estructuras estarán listas para probarse, sin células, en personas que hayan sufrido un infarto de miocardio. Nuestros experimentos recientes en cerdos han confirmado lo que ya observamos en ratas: incluso sin células en su interior, los armazones de alginato parecen prevenir la expansión del infarto, así como la remodelación de la pared del ventrículo. Por tanto, los armazones sin células podrían resultar especialmente efectivos en la prevención de la insuficiencia cardíaca, comenzando en pacientes cuyos corazones todavía no hubieran experimentado una remodelación significativa.

La aparente capacidad del alginato para fomentar la angiogénesis sugiere también que podría utilizarse para potenciar la supervivencia de las células trasplantadas. Primero se implantaría un armazón y luego, una vez se hubiera producido su vascularización, se "sembraría" con células. Hemos probado en ratas la eficacia de esta formación de tejido *in vivo*; los resultados son alentadores. La vascularización se puede potenciar mediante la liberación controlada, en el armazón, de microesferas llenas de factores de crecimiento. Sin embargo, dicha prevascularización reduce el espacio disponible en el interior del armazón para las células trasplantadas; por eso mismo, nuestro esfuerzo se centra ahora en domeñar la angiogénesis, combinando diversos factores de crecimiento.

En la actualidad, el enfoque *in vitro* de la ingeniería tisular es el que ofrece mayor control sobre la forma, composición y función del tejido. Además, en el caso de infartos que ya se han roto, debería reemplazarse una pieza entera del corazón. Sería necesario rellenar ese hueco con un injerto de tejido funcional, por lo que la implantación de un armazón esponjoso y vacío no resultaría viable. Por tanto, nos enfrentamos aún al problema de conservar vivo un tejido trasplantado hasta que se logra una vascularización local adecuada. Con la experiencia adquirida, estamos explorando la posibilidad de obtener un injerto prevascularizado.

PARCHES PARA EL CORAZON

Los ingenieros tisulares están explorando varios métodos para remendar el músculo cardíaco humano. Cada técnica ofrece alguna ventaja, pero lo que realmente contribuye al avance de este campo de investigación es el conocimiento que se obtiene de cada enfoque experimental.

	TECNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	**Inyección de células** Mediante un catéter o inyección, se introducen células madre o precursoras en el infarto	■ Fácil colocación ■ Las células inyectadas pueden inducir la formación de matriz extracelular y vasos sanguíneos	■ Baja supervivencia celular ■ Las células no producen nuevos miocitos funcionales
	**Cultivo de tejido** Se cultivan cardiomiocitos en láminas finas, dispuestas en capas para formar un parche que se implanta quirúrgicamente	■ Crece con relativa facilidad en el laboratorio ■ Ofrece mayor estabilidad que la inyección de células disociadas	■ Puesto que las láminas de cardiomiocitos carecen de vascularización, sólo resultan viables los parches delgados y pequeños ■ Extremadamente frágil
	**Armazones porosos** En un biorreactor se cultivan células “sembradas” en armazones tridimensionales de polímeros naturales o sintéticos; luego, se implantan quirúrgicamente	■ La estructura sustenta la organización celular y promueve la vascularización ■ Ciertos materiales pueden promover la vascularización	■ Transcurre demasiado tiempo entre la implantación y la vascularización del tejido; ello causa la muerte celular
	**“Impresión” de células en 3-D** Células suspendidas en hidrogel se distribuyen, mediante un dispositivo que opera a modo de una impresora de chorro de tinta, en la forma deseada; la estructura resultante se cultiva y luego se implanta quirúrgicamente	■ Permite colocar con precisión múltiples tipos de células ■ Las células se mueven y organizan libremente	■ Aún no se ha comprobado su funcionalidad *in vivo*
	**Armazones inyectables** Hidrogeles de polímeros, solos o con células en suspensión, se introducen directamente en el infarto mediante catéter o inyección	■ Fácil colocación ■ Al operar como sustituto temporal de la matriz extracelular puede potenciar la regeneración	■ Control limitado de la formación de tejido

NABIL DIB *INSTITUTO DEL CORAZON DE ARIZONA* Y JONATHAN DINSMORE *GenVec, Inc. (Inyección al corazón)*; DE T. SHIMIZU ET AL. EN *CIRCULATION RESEARCH*, VOL. 90, Nº 3, PAG. e40; 2002 © AHA/LWW *(cultivo de tejido)*; MICHAL SHACHAR, RONIT BASHER Y SMADAR COHEN *Universidad Ben-Gurion (armazón poroso)*; B. TEFFT, CORTESIA DE T. BOLAND *Universidad de Clemson (oreja)*; K. STAUB, CORTESIA DE K.J.L. BURG *Universidad de Clemson (armazón inyectable)*

Hemos construido un lecho capilar *in vitro* mediante siembra de células endoteliales, que tapizan el interior de las paredes de los vasos sanguíneos, en un armazón de alginato; el constructo se cultiva en un “biorreactor”. El siguiente paso será conseguir que se formen capilares dentro del parche miocárdico; para ello cultivaremos conjuntamente células endoteliales y cardiomiocitos en un armazón de alginato. En el caso de tener éxito, habrá que comprobar entonces si este lecho capilar se torna operativo tras el trasplante y, de ser así, determinar con qué rapidez lo hace. Si conecta rápidamente con la vascularización local, entonces las probabilidades de supervivencia del trasplante deberían ser excelentes.

Por descontado, nuestro grupo no es el único que se dedica a la ingeniería del tejido cardíaco. Cada uno con un enfoque distinto, numerosos investigadores están trabajando en la obtención de tejido prevascularizado. Aunque puede que sean necesarios otros 15 años para ver nuestro sueño hecho realidad, construir un injerto vivo para el corazón humano ha dejado de ser una idea extravagante.

Los autores

Smadar Cohen y **Jonathan Leor** vienen colaborando en la obtención de injertos de músculo cardíaco desde hace seis años. Cohen, profesora de biotecnología en la Universidad israelí Ben-Gurion del Negev, estudia la respuesta celular a señales externas. Se dedica también al diseño y síntesis de biopolímeros para la ingeniería tisular y para el transporte y liberación controlados de fármacos. Leor es cardiólogo en el Hospital Sheba y director del Instituto Neufeld de Investigación Cardíaca en la Universidad de Tel Aviv. Su trabajo se centra en la regeneración del músculo cardíaco mediante el trasplante de células, la ingeniería tisular y la terapia génica.

Bibliografía complementaria

TAILORING THE PORE ARCHITECTURE IN 3-D ALGINATE SCAFFOLDS BY CONTROLLING THE FREEZING REGIME DURING FABRICATION. Sharon Zmora, Rachel Glickis y Smadar Cohen en *Biomaterials*, vol. 23, págs. 4087-4094; octubre, 2002.

TISSUE ENGINEERING: CURRENT STATE AND PERSPECTIVES. Erin Lavik y Robert Langer en *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 65, n.º 1, págs.1-8; julio, 2004.

MYOCARDIAL TISSUE ENGINEERING: CREATING A MUSCLE PATCH FOR A WOUNDED HEART. Jonathan Leor y Smadar Cohen en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1015, págs. 312-319; mayo, 2004.



1. DECIR QUE UN AGUJERO NEGRO es una computadora puede parecer absurdo, pero está resultando útil en el estudio de la cosmología y de la física fundamental. Si se lograse crear agujeros negros en los aceleradores de partículas —se predice que será factible en el plazo de un decenio—, tal vez se pueda observar que efectúan cómputos.

Computación en agujeros negros

Conforme al espíritu de nuestro tiempo, cabe interpretar las leyes de la física como programas informáticos y, el universo, como un colosal ordenador

Seth Lloyd e Y. Jack Ng

¿En qué se diferencian una computadora y un agujero negro? No se trata del principio de algún chiste, sino de uno de los problemas más profundos de la física actual. Para casi todos, un ordenador es un artilugio especializado, se trate de una caja puesta sobre una mesa de oficina o de un chip del tamaño de una uña incrustado en una cafetera. Para un físico, en cambio, no hay sistema físico que no sea una computadora. Las rocas, las bombas atómicas o las galaxias no ejecutan Linux, pero no por ello dejan de registrar y procesar información. Cada electrón, cada fotón o cualquier partícula elemental almacena bits de datos; cada vez que dos de esas partículas interaccionan, los bits se transforman. La existencia física y el contenido de información están inextricablemente ligados; o, según el dicho de John Wheeler, de la Universidad de Princeton: *It from bit*. De la información, de los bits, sale cada "eso" que haya en el mundo.

Los agujeros negros podrían parecer la excepción de la regla de que todo computa. No hay dificultad en introducirles información, pero según la teoría de la relatividad general de Einstein, es imposible extraérsela. El agujero negro asimila la materia que recibe; el detalle de su composición se pierde sin remedio. Hace unos treinta años, Stephen Hawking, de la Universidad de Cambridge, demostró que, cuando se tomaban en consideración los aspectos cuánticos, los agujeros negros debían emitir como una brasa. Según el análisis de Hawking, la radiación saliente del agujero negro es aleatoria: no transporta información relativa a lo que haya entrado en él. Si un elefante cayera en el agujero, de éste saldría energía por valor de un elefante, pero convertida en un revoltijo tal que no valdría, ni siquiera en teoría, para recrear el animal.

Esta aparente pérdida de información plantea todo un enigma, porque en las leyes de la mecánica cuántica la información se conserva. Por tal motivo, otros científicos, entre ellos Leonard Susskind, de la Universidad Stanford, John Preskill, del Instituto de Tecnología de California, y Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, han aducido que la radiación de un agujero negro no es, en realidad, aleatoria, sino que consiste en una forma procesada de la materia que cae en él [*véase* "Los agujeros negros y la paradoja de la información" por Leonard Susskind; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1997]. El verano pasado, Hawking se avino a este punto de vista: también los agujeros negros computan.

Los agujeros negros constituyen el ejemplo más singular del principio general que

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

enuncia que el universo registra y procesa información. El principio, en sí mismo, no es nuevo. Para explicar las leyes de la termodinámica, los fundadores de la mecánica estadística, en el siglo XIX, desarrollaron la que en tiempos modernos se llamaría teoría de la información. A primera vista, no da la impresión de que la termodinámica y la teoría de la información tengan algo en común. La primera fue ideada para explicar las máquinas de vapor; la segunda, para optimizar las comunicaciones. Sin embargo, la magnitud termodinámica que limita la capacidad de un motor para realizar trabajo útil, la entropía, resulta ser proporcional al número de bits registrados por las posiciones y velocidades de las moléculas de una sustancia. La invención de la mecánica cuántica, ya en el siglo XX, asentó este descubrimiento sobre cimientos cuantitativos firmes e introdujo la noción de información cuántica. Los bits que integran el universo son bits cuánticos, "cubits", dotados de propiedades mucho más ricas que los bits ordinarios.

Los análisis del universo mediante bits y bytes no sustituyen a los basados en conceptos tradicionales, como la fuerza o la energía, pero sí sacan a la luz hechos nuevos y sorprendentes. Así, por ejemplo, en el campo de la mecánica estadística han desentrañado la paradoja del demonio de Maxwell, que parecía dar pie al movimiento continuo. En los últimos años hemos venido aplicando estas mismas ideas a la cosmología y la física fundamental: a la naturaleza de los agujeros negros y la energía oscura, a la estructura a escalas muy reducidas del espaciotiempo y a las leyes últimas de la naturaleza. El universo no es solamente una colosal computadora: es una colosal computadora cuántica. Con palabras de Paola Zizzi, de la Universidad de Padua: *It from qubit*.

Gigahertz: demasiado lento

La confluencia de la física y la teoría de la información parte del aforismo central de la mecánica cuántica: la naturaleza, en el fondo, es discreta. Cualquier sistema físico se describe con un número finito de bits. Cada partícula del sistema actúa como una puerta lógica de un ordenador. Su "eje" de espín puede apuntar sólo en una de dos direcciones; codifica, pues, un bit. Y esa orientación se puede invertir; equivale a una operación computacional sencilla.

El sistema también es discreto en cuanto al tiempo. La inversión de un bit no puede llevar menos de cierto tiempo. El valor exacto de ese lapso mínimo viene dado por un teorema formulado por dos precursores de la física del procesamiento de información, Norman Margolus, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Lev Levitin, de la Universidad de Boston. Este teorema guarda relación con el principio de incertidumbre de Heisenberg, que enuncia el compromiso inherente a la medición de pares de algunas magnitudes físicas, como la posición y el momento, o el tiempo y la energía. Según el teorema, el tiempo t necesario para invertir un bit depende de la cantidad de energía aplicada, E. Cuanto mayor sea la energía aplicada, menor podrá ser el tiempo. En lenguaje formal: $t \geq h/4E$, donde h es la constante de Planck, el principal parámetro de la teoría cuántica. Por ejemplo, un tipo de ordenador cuántico experimental almacena bits en protones y se vale de campos magnéticos para invertirlos. Las operaciones se efectúan en el tiempo mínimo admitido por el teorema de Margolus-Levitin.

De este teorema se puede deducir una enorme variedad de conclusiones; lo mismo imponen limitaciones a la geometría del espaciotiempo que determinan la capacidad computacional del universo considerado en su globalidad. A modo de ejercicio preliminar, examinemos los límites de la potencia computacional de la materia ordinaria. Pensemos en una masa de 1 kilogramo que ocupa un volumen de 1 litro. Llamaremos a este dispositivo "el portátil supremo".

Su batería es la propia materia, convertida directamente en energía mediante la famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$. Aplicada toda esta energía a la inversión de bits, el ordenador efectuaría al principio 10^{51} operaciones por segundo, pero iría perdiendo velocidad al irse degradando la energía. La capacidad de memoria de la máquina se calcula a través de la termodinámica. Cuando 1 kilogramo de materia se convierte en energía en un volumen de 1 litro, su temperatura es de 1000 millones de grados kelvin. Su entropía, proporcional a su energía dividida por la temperatura, corresponde a 10^{31} bits de información. El portátil supremo almacena información en los microscópicos movimientos y posiciones de las partículas elementales que se agitan por su interior. Entran en juego todos y cada uno de los bits que las leyes de la termodinámica autorizan.

Cada vez que interactúan dos partículas, cada una puede hacer que los bits de la otra salten de un estado al otro. Cabe comparar este proceso a un lenguaje de programación, como C o Java: las partículas son las variables; sus interacciones se corresponden con operaciones, como la adición. Cada bit puede cambiar de estado 10^{20} veces por segundo; equivale a una velocidad de

Resumen/Computadoras cósmicas

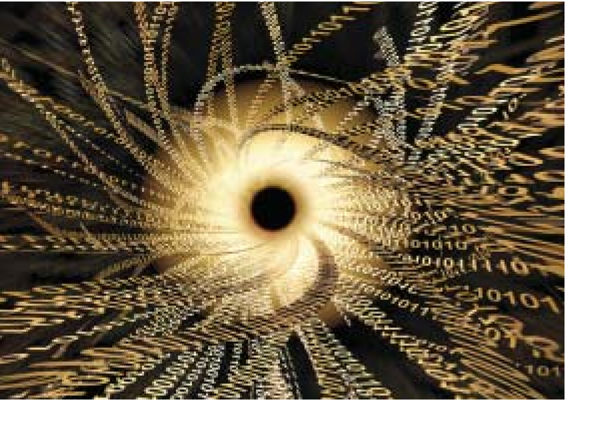
- Los sistemas físicos, por su mera existencia, almacenan información, que procesan al evolucionar en el tiempo. El universo computa.
- Si puede escapar información de los agujeros negros, como hoy opinan muchos físicos, también los agujeros negros computan. El tamaño de su capacidad de memoria es proporcional al cuadrado de su velocidad de cómputo. Esa potencia de cómputo se debe a la naturaleza mecanocuántica de la información; de faltar los efectos cuánticos, los agujeros negros, en vez de procesar la información, la destruirían.
- Las leyes físicas que limitan la potencia de los ordenadores determinan también la precisión con la que es posible medir el universo. Puesto que resulta menor de lo que se había creído, los "átomos" discretos del espacio y del tiempo quizá sean mayores de lo esperado.

COMPUTACION MAXIMA

¿Qué es una computadora? Se trata de una cuestión cuya complejidad sorprende, pero cualquiera que sea la definición exacta que se adopte, quedará satisfecha no sólo por los objetos conocidos por “ordenadores”, sino también por todo cuanto hay en el mundo. Los objetos físicos pueden resolver una amplia clase de problemas de lógica o de matemáticas, si bien puede que no acepten la introducción o la salida de datos en formas con significado para las personas. Las computadoras naturales son intrínsecamente numéricas: almacenan datos mediante estados cuánticos discretos, como el espín de las partículas elementales. La mecánica cuántica les sirve de conjunto de instrucciones.

	ENTRADA	COMPUTACION	SALIDA
PORTATIL ORDINARIO VELOCIDAD: 10^9 Hz ■ MEMORIA: 10^{12} bits	Un teclado y los circuitos asociados codifican la información mediante impulsos eléctricos en un conductor.	Los impulsos interaccionan, guiados por dispositivos electrónicos que efectúan operaciones, como la negación lógica, NO.	Los impulsos, una vez procesados, se traducen a patrones lumínicos dotados de significado.
PORTATIL SUPREMO VELOCIDAD: 10^{20} Hz ■ MEMORIA: 10^{31} bits	Consiste en 1 kilo de plasma muy caliente en un contenedor de 1 litro. Este dispositivo acepta datos codificados por medio de posiciones, velocidades y espines de partículas.	Las partículas interaccionan. Las colisiones pueden disponerse de manera que efectúen operaciones como NO: una colisión puede hacer que una partícula pase de uno a otro de dos estados cuánticos.	Se pueden medir y traducir las propiedades de las partículas al escapar de su contenedor. El sistema pierde velocidad al irse degradando la energía.
AGUJERO NEGRO VELOCIDAD: 10^{35} Hz ■ MEMORIA: 10^{16} bits	Este agujero negro consiste en 1 kilo de masa concentrado en un radio de 10^{-27} metros. Los datos e instrucciones están codificados en la materia que cae en él.	Durante su caída, las partículas interactúan tanto como en el portátil supremo, pero ahora también interviene la gravedad. No se conocen todavía las leyes que rigen su actuación.	El agujero emite una radiación apodada “de Hawking” en honor a este físico. Hay teorías nuevas que proponen que esa radiación lleva en sí el resultado del cómputo.

ALFRED T. KAMAJIAN



reloj de 100 trillones de hertz. A decir verdad, el sistema es demasiado rápido para que lo controle un reloj central. El tiempo que tarda un bit en cambiar de estado viene a ser el que tarda una señal en viajar desde un bit hasta su vecino. Así pues, el portátil supremo opera con un grado muy alto de paralelismo: no actúa como un solo procesador, sino como una inmensa agrupación de procesadores; cada uno trabaja sin depender apenas de los demás y les comunica sus resultados con relativa lentitud.

En comparación, un ordenador ordinario manipula bits a razón de unas 10^9 veces por segundo, almacena unos 10^{12} bits y cuenta con un solo procesador. Si fuera posible que se siguiese cumpliendo indefinidamente la ley de Moore —según la cual el crecimiento del número de componentes y del rendimiento de los chips es exponencial—, nuestros descendientes podrían adquirir el portátil supremo a mediados del siglo XXIII. Antes, los ingenieros habrían tenido que dar con el modo de controlar con precisión las interacciones de las partículas de un plasma más caliente que el núcleo del Sol; deberían disponer, además, de buena parte del ancho de banda de las telecomunicaciones para controlar el ordenador y enmendar los errores. Y tendrían que habérselas con diabólicos problemas al construir el recipiente del ordenador.

En cierto sentido, es posible ya adquirir un artilugio por el estilo, si se tienen los contactos adecuados. "Kilo de materia convertido por completo en energía" define de manera sucinta una bomba de hidrógeno de 20 megatones. Durante la explosión, un arma nuclear procesa una ingente cantidad de información: la configuración de partida aporta los datos iniciales; el resultado viene dado por la radiación que emite.

De la nanotecnia a la xenotecnia

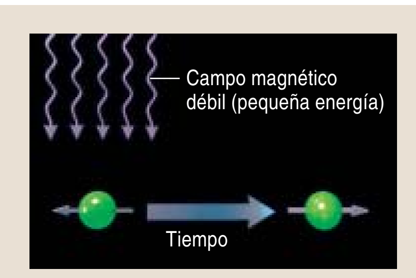
Si un trozo cualquiera de materia es un ordenador, un agujero negro no es ni más ni menos que una computadora comprimida hasta su mínimo tamaño posible. Cuando una computadora va reduciendo su tamaño, las fuerzas gravitatorias que cada uno de sus componentes ejerce sobre los demás se van haciendo más y más intensas, y acaban siéndolo tanto, que ningún objeto puede escapar. El tamaño de un agujero negro, su "radio de Schwarzschild", es proporcional a su masa.

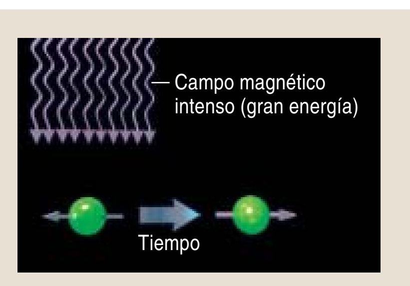
El agujero negro correspondiente a una masa de 1 kilogramo tiene un radio de unos 10^{-27} metros. (Para hacerse una idea: el radio de un protón es de 10^{-15} metros.) La reducción de tamaño del ordenador no modifica su contenido energético. Podrá todavía efectuar 10^{51} operaciones por segundo, las mismas que antes, pero su capacidad de memoria habrá cambiado. Cuando la gravitación es insignificante, la capacidad total de almacenamiento resulta proporcional al número de partículas y, por consiguiente, al volumen. Pero cuando predomina la gravedad, las partículas se interconectan y, en consecuencia, su capacidad colectiva de almacenar información disminuye. La capacidad total de almacenamiento de un agujero negro es proporcional a la extensión de su superficie. Hawking y Jacob Bekenstein, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, calcularon hace unos 30 años que un agujero negro de 1 kilogramo podría registrar alrededor de 10^{16} bits, muchísimo menos que esa misma computadora antes de ser comprimida.

En compensación, el agujero negro procesa mucho más deprisa. El tiempo que le lleva invertir un bit, 10^{-35} segundos, coincide con el tiempo que tarda la luz en ir de uno a otro lado de la computadora. Así pues, en contraste con el portátil supremo, que en gran medida opera en paralelo, el agujero negro opera secuencialmente, en serie. Actúa como si se tratara de una sola unidad.

¿Cómo funcionaría en la práctica una computadora de agujero negro? La introducción de datos no presentaría dificultades: bastaría codificarlos mediante materia y energía y dejarlos caer al agujero. Preparando adecuadamente el material que se le arrojase, sería posible programar el agujero para que realizase el cómputo que se quisiera. En cuanto esa materia ingresase en el agujero, desaparecería para siempre; la demarcación que señala el punto sin retorno recibe el nombre de horizonte de sucesos. Más allá, las partículas en caída libre interaccionan entre sí y efectúan cómputos durante un tiempo finito, hasta que alcanzan el centro del agujero —la singularidad— y dejan de existir. Qué le ocurre a la materia cuando se estruja en la singularidad, depende de la verdadera naturaleza de la gravitación cuántica, que seguimos sin conocer.

El resultado que el agujero ofrece al exterior adopta la forma de radiación de Hawking. Un agujero de un kilo emite radiación de Hawking; puesto que se ha de conservar la energía, esa masa de un kilo habrá





2. LA PRIMERA LEY de la computación cuántica es que todo cómputo requiere energía. El espín de un protón codifica un bit individual, que cabe invertir aplicando un campo magnético. Cuanto más intenso sea el campo magnético, cuanta mayor la energía que se le aplique al protón, tanto más velozmente cambiará de estado la partícula.

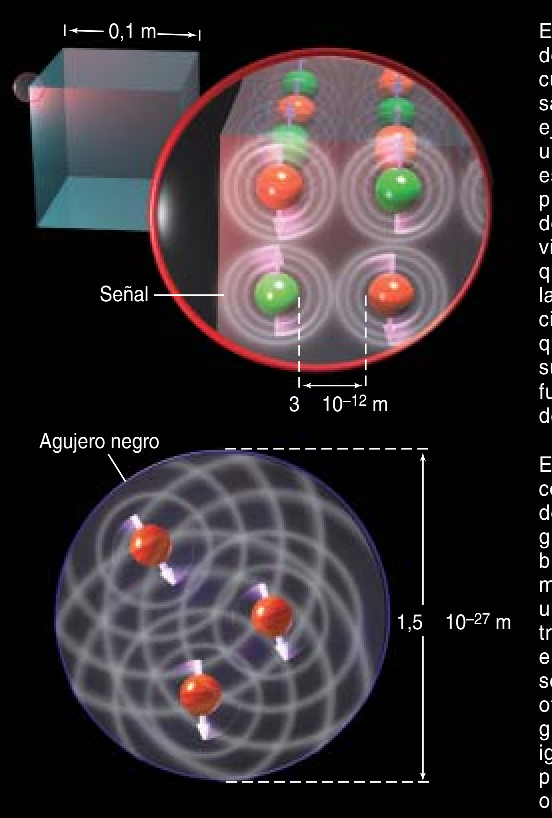


de disminuir, hasta desaparecer por completo en 10^{-21} segundos. La radiación de máxima intensidad tiene una longitud de onda igual al radio del agujero; en el caso de un agujero de un kilogramo, se trataría de una radiación gamma intensísima. Un detector de partículas la captaría y la descodificaría para consumo humano.

El estudio que Hawking realizó de la radiación que lleva su nombre refutó la imposibilidad que se atribuía a los agujeros negros de que nada escapara de ellos [*véase* "La mecánica cuántica de los agujeros negros", por Stephen W. Hawking; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1977]. La tasa de radiación de los agujeros negros se encuentra en relación inversa con su tamaño: los grandes, como los situados en el centro de las galaxias, pierden energía mucho más despacio de lo que engullen materia. Es posible, sin embargo, que en el futuro quepa crear diminutos agujeros negros en los aceleradores de partículas. Estallarían, de inmediato, en una erupción de radiación. No debe concebirse un agujero negro como un objeto fijo, sino como una agregación transitoria de materia que efectúa cómputos a la máxima velocidad posible.

CLASIFICACION DE COMPUTADORAS

El portátil supremo y el agujero negro constituyen otros tantos métodos de aumentar la potencia de cómputo. El portátil es la suprema computadora en paralelo (una formación de procesadores que operan simultáneamente). El agujero negro es el ordenador secuencial supremo (un único procesador que ejecuta las instrucciones de una en una).



El portátil supremo consta de una colección de partículas que codifican y procesan bits. Cada una puede ejecutar una instrucción en unos 10^{-20} segundos. En ese tiempo las señales sólo pueden viajar una distancia de 3×10^{-12} metros, que viene a ser la separación que existe entre las partículas. Así pues, la comunicación es mucho más lenta que la computación. Las subregiones del ordenador funcionan de forma casi independiente.

El agujero negro también consiste en una colección de partículas. A causa de la gravedad codifican menos bits, lo que se traduce en más energía por bit. Cada una puede ejecutar una instrucción en 10^{-35} segundos, el tiempo que tarda una señal en ir de un lado a otro del agujero. Por consiguiente, la comunicación es igual de rápida que la computación. La computadora opera como una unidad.

ALFRED T. KAMAJIAN

Plan de fuga

El auténtico problema consiste en saber si la radiación de Hawking entrega el verdadero resultado del cómputo o sólo produce un galimatías. Se sigue debatiendo al respecto, pero en la actualidad la mayoría de los físicos —Hawking incluido— opina que la radiación es una versión muy procesada de la información que ingresó en el agujero durante su formación. Aunque la materia no pueda abandonar el agujero, su contenido de información sí. En este momento, una de las cuestiones más apasionantes de la física consiste en comprender exactamente cómo.

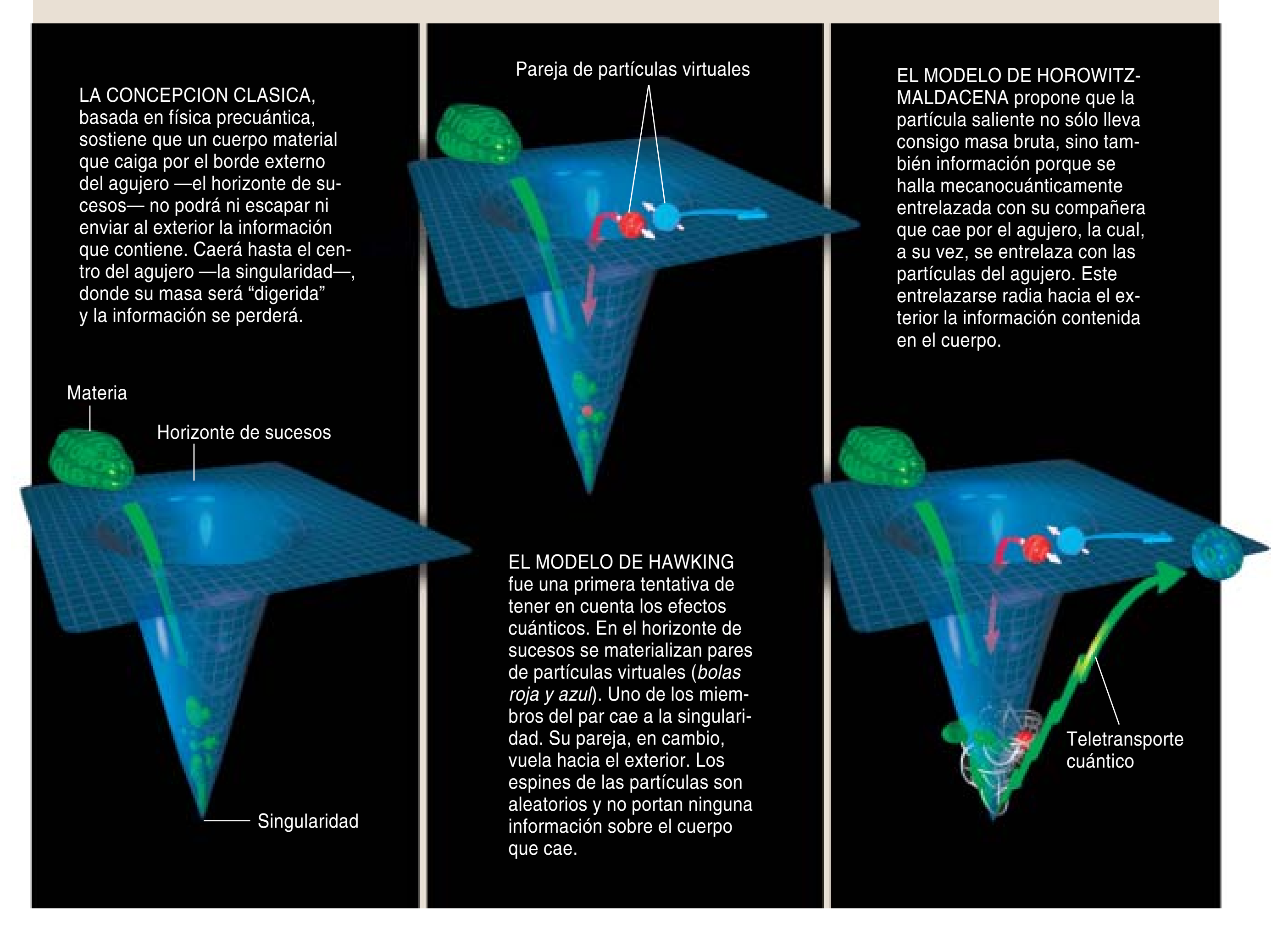
En 2003, Gary Horowitz, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Juan Maldacena, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, esbozaron un posible mecanismo. La portilla de escape es el "entrelazamiento", un fenómeno cuántico que mantiene correlaciones entre las propiedades de dos o más sistemas aunque medie entre ellos cualquier extensión de espacio y tiempo. El entrelazamiento permite el teletransporte, proceso que reproduce la información de una partícula en otra con tal fidelidad, que, a todos los efectos, la propia partícula se transfiere de una posición a otra a la velocidad de la luz.

El teletransporte, que ya ha sido verificado en los laboratorios, requiere previamente que las dos partículas estén entrelazadas. A continuación se efectúa una medición en una de las partículas juntamente con materia que contenga la información que ha de teletransportarse. La medición borra la información en su ubicación primitiva, pero debido al entrelazado, esa información reside en forma codificada en la segunda partícula, por distante que se halle. La información se puede descodificar utilizando como clave los resultados de las mediciones [*véase* "Teletransporte cuántico", por Anton Zeilinger; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2000].

Un procedimiento parecido podría valer para los agujeros negros. Pares de fotones entrelazados se materializan en el horizonte de sucesos. Uno de los fotones vuela hacia el exterior, integrado en la radiación de Hawking que un observador podrá detectar. El otro cae al interior y acaba en la singularidad junto con la materia que formó el agujero negro. La aniquilación del fotón equivale a una medición y transfiere la información contenida en

Evolución de la teoría de los agujeros negros

"Un objeto de tan gran densidad que nada, ni la luz, puede escapar de él"; esta definición de agujero negro se ha convertido en tópico de artículos de periódico y clases para principiantes. Pero probablemente es errónea. Desde hace unos 30 años se acepta que la energía se va escapando de un agujero negro. Muchos físicos opinan ahora que con la información (la descripción de la forma que toma la energía) ocurre lo mismo. En los diagramas se muestra el aspecto de un agujero negro observado desde un punto imaginario exterior al espacio-tiempo.



la materia a la emisión de Hawking eferente.

La diferencia con el teletransporte de laboratorio estriba en que no se necesitan los resultados de esta "medición" para descodificar la información que fue teletransportada. Horowitz y Maldacena razonaron que la aniquilación no tiene una variedad de posibles resultados, sino solamente uno. Un observador externo podría determinar este único resultado gracias a métodos físicos básicos; de ese modo desentrañaría la información. Esta conjetura se sitúa a extramuros de la formulación habitual de la mecánica cuántica. Aunque controvertida, es verosímil. Al igual que puede que la singularidad esencial con que dio comienzo el universo tuviese sólo un estado posible, quizá también las singularidades finales del interior de los agujeros negros posean un único estado. En junio de 2004, uno de nosotros (Lloyd) demostró que el mecanismo Horowitz-Maldacena es robusto; no depende de cuál sea exactamente el estado final, siempre que haya alguno. No obstante, todavía parece llevar a una pequeña pérdida de información.

Otros han propuesto mecanismos de escape que se fundan también en singulares fenómenos cuánticos. En 1996, Andrew Strominger y Cumrun Vafa, de la Universidad de Harvard, propusieron que los agujeros negros se componen de unas estructuras multidimensionales, las "branas", que aparecen en la teoría de cuerdas. La información que cae en el agujero negro se almacena en ondas de las branas y puede acabar por filtrarse al exterior. A principios de 2004, Samir Mathur, de la Universidad Estatal de Ohio, y sus colaboradores modelizaron un agujero negro mediante un gigantesco ovillo de cuerdas. Esta "bola difusa" actúa a modo de contenedor de la información que portan los objetos que caen en el agujero negro. La bola emite radiación que refleja esta información. Hawking, en su análisis reciente, ha razonado que las fluctuaciones cuánticas impiden que

ALFRED T. KAMAJIAN

llegue a formarse jamás un horizonte de sucesos nítidamente definido. Estas ideas esperan aún el veredicto.

Ciberespaciotiempo

Las propiedades de los agujeros negros están inextricablemente imbricadas con las del espaciotiempo. Es decir, si los agujeros negros pueden ser tenidos por computadoras, otro tanto vale para el propio espaciotiempo. La mecánica cuántica predice que el espaciotiempo, igual que otros sistemas físicos, es discreto. No resulta posible medir con precisión infinita ni las distancias, ni los tiempos; a escala muy pequeña, el espacio tiene una estructura espumosa, llena de burbujas. La cantidad máxima de información que se puede guardar en una región del espacio depende de lo pequeños que sean los bits, y éstos no puede ser menores que las celdillas espumosas.

Desde hace mucho, se cree que el tamaño de estas celdillas es la longitud de Planck (l_P), unos 10^{-35} metros, la distancia a la que cuentan por igual los efectos gravitatorios y las fluctuaciones cuánticas. En tal caso, la naturaleza espumosa resultará siempre demasiado diminuta para que podamos observarla. Pero como han demostrado Hendrik van Dam, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, Frigyes Károlházy, de la Universidad Lorand Eötvös de Hungría, y uno de nosotros (Ng), dichas celdillas son en realidad mucho mayores. Carecen de tamaño fijo: cuanto mayor sea una región del espaciotiempo, tanto mayores serán las celdas que la constituyen. Esta afirmación se nos puede antojar paradójica a primera vista, como si los átomos fuesen mayores en un elefante que en un ratón, pero Lloyd la ha deducido también de las leyes que limitan la potencia de los ordenadores.

El proceso de cartografiar la geometría del espaciotiempo es una especie de computación donde las distancias se calibran mediante transmisión y procesamiento de información. Una de las formas de hacerlo consistiría en llenar una región del espacio con un enjambre de satélites de GPS (sistema de localización global), cada uno con un reloj y un radiotransmisor (*véase el recuadro* "Cómputo del espaciotiempo"). Para medir una distancia, un satélite envía una señal y cronometra cuánto tarda en llegar. La precisión de la medida depende de la brevedad del tic-tac del reloj. La generación de tic-tacs es una operación de computación; su ritmo máximo viene, pues, dado por el teorema de Margolus-Levitin: el tiempo que separa dos de esas marcas temporales es inversamente proporcional a la energía.

La energía, por su parte, también está limitada. Si se les da a los satélites demasiada energía, o si se los agrupa demasiado juntos, formarán un agujero negro y ya no podrán participar en la cartografía. (El agujero seguirá emitiendo radiación de Hawking, pero de una longitud de onda igual al tamaño del propio agujero: no valdrá para cartografiar accidentes a una escala más fina.) La energía total máxima de la constelación de satélites es proporcional al radio de la región que se esté cartografiando.

Así pues, la energía aumenta más despacio que el volumen de la región. Al ir creciendo ésta, el cartógrafo se ha de enfrentar a un compromiso inevitable: o bien reduce la densidad de satélites (de modo que estén más separados entre sí), o bien reduce la energía disponible en cada satélite (con lo que sus relojes batirán más lentamente). En uno y otro caso, la medición se tornará menos precisa. En el tiempo que se invierte en cartografiar una región de radio R, el número total de tics y tacs de todos los satélites es R^2/l_P^2. Si cada satélite genera justo un tic durante el cartografiado, los satélites distarán entre sí, de media, $R^{1/3}l_P^{2/3}$. Es posible medir distancias más cortas en una subregión, pero sólo a costa de la pérdida de precisión en otra. El razonamiento mantiene su validez aun cuando se expanda el espacio.

Esta fórmula proporciona la precisión con la que cabe medir las distancias; es aplicable cuando el aparato de medida se encuentra a punto de convertirse en agujero negro. Por debajo de la escala mínima, la geometría deja de existir. Este grado de precisión es muchísimo más fino que la longitud de Planck, aunque harto exiguo todavía. La imprecisión media en la medición del tamaño del universo observable ronda los 10^{-15} metros. Podrían detectarla instrumentos muy precisos de medición de distancias, como los futuros observatorios de ondas gravitatorias.



Principio holográfico

Desde el punto de vista teórico, el aspecto más importante de este resultado es que proporciona un nuevo modo de considerar los agujeros negros. Ng ha demostrado que la extraña dependencia de la escala de las fluctuaciones espaciotemporales con la raíz cúbica de las distancias lleva también a la fórmula de Bekenstein y Hawking para la memoria de los agujeros negros. Y a una acotación válida para toda computación por agujeros negros: el número de bits de la memoria es proporcional al cuadrado de la velocidad de cómputo. La constante de proporcionalidad es Gh/c^5, lo que pone de manifiesto el vínculo entre la información y las teorías de la relatividad especial (cuyo parámetro definitorio es la velocidad de la luz, c), de la relatividad general (la constante de gravitación, G) y de la mecánica cuántica (h).

El resultado anterior —quizás ahí resida su mayor importancia— conduce directamente al principio holográfico, según el cual nuestro universo tridimensional es, en un sentido profundo aún insondable, bidimensional. La cantidad máxima de información que una región puede almacenar parece ser proporcional no a su volumen, sino al área de la superficie que la delimita [*véase* "La información en el universo holográfico", por Jacob D. Bekenstein; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2003]. Se suele considerar que el principio holográfico emana de los detalles ignorados de la gravi-

Cómputo del espaciotiempo

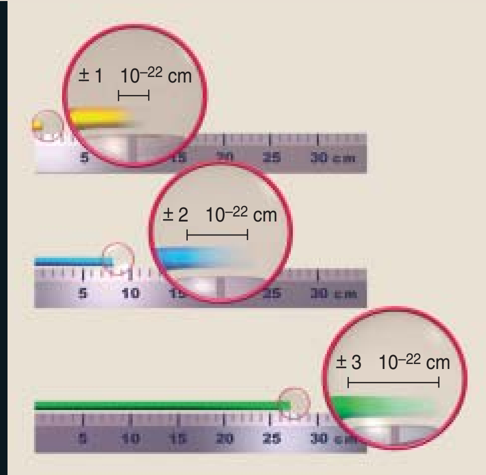
La medición de distancias e intervalos de tiempo constituye una forma de computación y está sometida a las mismas limitaciones que los ordenadores normales. Resulta que el proceso de medición es mucho más espinoso de lo que se había creído.

PARA CARTOGRAFIAR un volumen de espacio se podría utilizar una constelación de satélites como los del GPS, que efectuasen mediciones enviando señales y cronometrando su llegada. Para lograr una precisión máxima sería necesario un gran enjambre. Pero el número de satélites tiene un límite: si son demasiados, el sistema completo se derrumbará sobre sí mismo por efecto de su propia gravedad y se convertirá en un agujero negro.

Para medir una región de diámetro doble se podría utilizar un número doble de satélites. Pero como el volumen sería entonces ocho veces mayor, los satélites habrían de estar más separados unos de otros. Cada uno habría de cubrir una subregión mayor; le dedicaría menor atención a cada medición, con la consiguiente reducción de su precisión.

▲ RADIO: 100 km
SATELITES: 4
SEPARACION: 90 km

▼ RADIO: 200 km
SATELITES: 8
SEPARACION : 150 km
AUMENTO DEL ERROR: 26 %



LA INCERTIDUMBRE DE LA MEDIDA no es, por lo tanto, fija, sino que puede variar con el tamaño del objeto que se mide. Cuanto mayor sea el objeto, tanto más borrosos serán los pormenores de su estructura. No ocurre igual en la vida ordinaria, donde la imprecisión de la medida, independiente del tamaño del objeto, depende sólo de cuán finas sean las subdivisiones de nuestra regla. Es como si nuestra elección de qué se va a medir afectase a la estructura fina del espaciotiempo.

ALFRED T. KAMAJIAN

tación cuántica; empero, también procede en línea recta de las limitaciones cuánticas fundamentales que sufre la precisión de las medidas.

10^{123}

Los principios de computación pueden aplicarse no sólo a los ordenadores más compactos (los agujeros negros) y diminutos (la espuma del espaciotiempo), sino también al mayor de todos: el universo. Es posible que sea infinito en extensión, pero ha existido desde hace un tiempo finito, al menos en su forma presente. El radio de la porción observable en la actualidad mide, hoy, unas decenas de millones de años luz. Para que podamos conocer el resultado de un cómputo es necesario que haya tenido lugar.

El análisis anterior sobre el número de tic-tacs proporciona también el número de operaciones que han podido realizarse en el universo desde su comienzo: 10^{123}. Compárese este límite con el comportamiento de la materia que nos rodea: la materia visible, la materia oscura y una energía a la que se llama oscura, que está provocando que el universo se expanda a ritmo acelerado. La densidad de energía cósmica observada es de unos 10^{-9} joule por metro cúbico, por lo que el universo visible contiene una energía de alrededor de 10^{72} joule. De acuerdo con el teorema de Margolus-Levitin, puede efectuar hasta 10^{106} operaciones por segundo, lo que corresponde a un total de 10^{123} desde su origen hasta el presente. Dicho de otro modo, el universo ha efectuado el número máximo de operaciones que las leyes de la física permiten.

Para calcular la capacidad total de memoria de la materia ordinaria, la formada por átomos, se pueden aplicar los métodos normales de la mecánica estadística y la cosmología. La materia puede albergar el máximo de información cuando se convierte en partículas energéticas y sin masa, como los neutrinos o los fotones, cuya densidad entrópica es proporcional al cubo de su temperatura. La densidad de energía de las partículas (que determina el número de operaciones que pueden efectuar) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura. Así pues, el número total de bits es precisamente el número de operaciones elevado a la potencia tres cuartos. El valor correspondiente a la totalidad del universo es 10^{92} bits. Si las partículas contienen estructura interna,

el número de bits puede ser algo mayor. Estos bits cambian de estado más deprisa que se intercomunican: la materia ordinaria es una computadora que funciona en gran medida en paralelo, lo mismo que el portátil supremo y a diferencia del agujero negro.

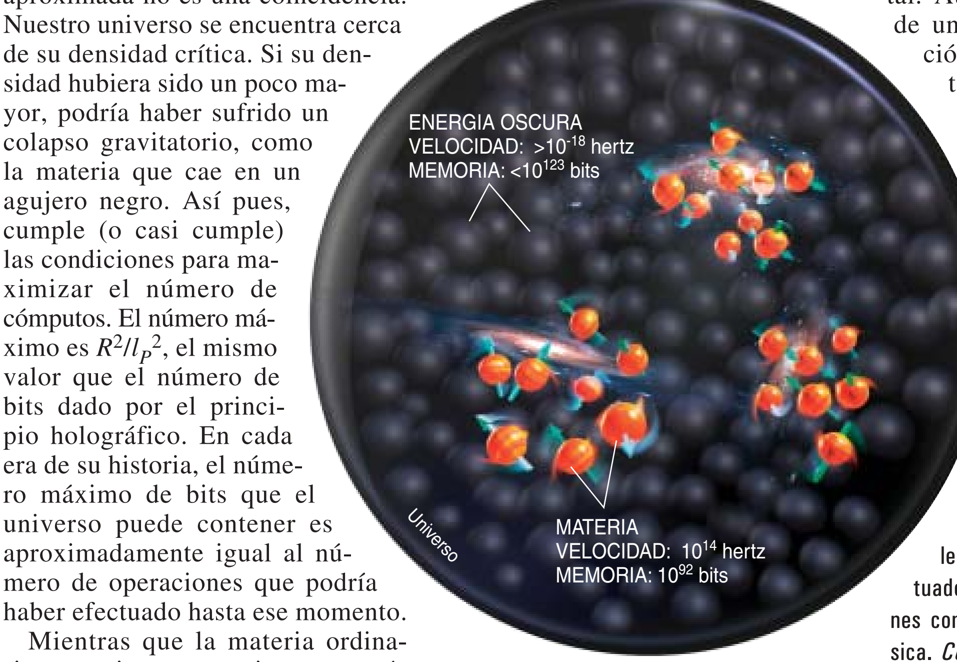
En cuanto a la energía oscura, no se sabe qué es; no digamos ya cuánta información almacena. Pero según el principio holográfico, el universo puede almacenar un máximo de 10^{123} bits, número casi igual al del total de operaciones. Esta igualdad aproximada no es una coincidencia. Nuestro universo se encuentra cerca de su densidad crítica. Si su densidad hubiera sido un poco mayor, podría haber sufrido un colapso gravitatorio, como la materia que cae en un agujero negro. Así pues, cumple (o casi cumple) las condiciones para maximizar el número de cómputos. El número máximo es R^2/l_P^2, el mismo valor que el número de bits dado por el principio holográfico. En cada era de su historia, el número máximo de bits que el universo puede contener es aproximadamente igual al número de operaciones que podría haber efectuado hasta ese momento.

Mientras que la materia ordinaria experimenta un inmenso número de operaciones, la energía oscura se comporta de muy distinto modo. Si codificase el número máximo de bits autorizado por el principio holográfico, la abrumadora mayoría de esos bits no habría tenido tiempo para cambiar de estado más de una vez en el transcurso de la historia cósmica. Así pues, estos bits no ordinarios son meros espectadores de los cómputos efectuados a velocidad mucho mayor por un número mucho menor de bits ordinarios. Sea la materia oscura lo que fuere, no está llevando a cabo mucha computación. Ni tiene por qué: suministrar al universo la materia que se echa en falta y acelerar su expansión constituyen, en términos computacionales, tareas sencillas.

¿Qué está computando el universo? Que sepamos, no está produciendo una única respuesta a una única pregunta. Se está computando a sí mismo. Conducido y propulsado por el modelo estándar a modo de programa, el universo computa campos cuánticos, compuestos químicos, bacterias, seres humanos, estrellas y galaxias. Mientras computa, va cartografiando su propia geometría espaciotemporal con la precisión máxima permitida por las leyes de la física. La computación es la existencia.



Estos resultados, válidos para los ordenadores normales, los agujeros negros, la espuma espaciotemporal y la cosmología, dan testimonio de la unidad de la naturaleza y ponen de manifiesto las interconexiones conceptuales de la física fundamental. Aunque no se dispone todavía de una teoría cabal de la gravitación cuántica, sí sabemos que estará íntimamente conectada con la información cuántica. *It from qubit.*



3. EL UNIVERSO es un ordenador que consta de componentes de dos tipos. La materia (*en rojo*) es sumamente dinámica; actúa a modo de un ordenador ultrarrápido que computa en paralelo. La energía oscura (*en gris*) parece casi estática; procede como un ordenador secuencial, mucho más lento. Estos componentes han efectuado conjuntamente tantas operaciones como consienten las leyes de la física. *Computo, ergo sum*.

ALFRED T. KAMAJIAN

Los autores

Seth Lloyd e Y. Jack Ng tienden puentes entre la teoría cuántica de la información y la teoría cuántica de la gravitación. Lloyd es profesor de ingeniería mecanocuántica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts; ha diseñado la primera computadora cuántica realizable. Ng enseña física en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Estudia la naturaleza fundamental del espaciotiempo.

Bibliografía complementaria

ULTIMATE PHYSICAL LIMITS TO COMPUTATION. Seth Lloyd en *Nature*, vol. 406, págs. 1047-1054; 31 de agosto de 2000.

FROM COMPUTATION TO BLACK HOLES AND SPACE-TIME FOAM. Y. Jack Ng en *Physical Review Letters*, vol. 86, n.º 14, págs. 2946-2949; 2 de abril de 2001. Corrección de error en vol. 88, n.º 13, artículo 139.902(E) 14 de marzo de 2002.

COMPUTATIONAL CAPACITY OF THE UNIVERSE. Seth Lloyd en *Physical Review Letters*, vol. 88, n.º 23, artículo 237.901 Z; 10 de junio de 2002.

THE BLACK HOLE FINAL STATE. Gary T. Horowitz y Juan Maldacena en *Journal of High Energy Physics*. JHEP02(2004)008; 2004.hep-th/0310281.

INFORMATION: THE NEW LANGUAGE OF SCIENCE. Hans Christian von Baeyer. Harvard University Press, 2004.

Estructura del cerebro humano

De la investigación centrada en el tamaño y la forma del cerebro brotan nuevas ideas sobre el desarrollo neural, las diferencias entre sexos y la evolución humana

John S. Allen, Joel Bruss y Hanna Damasio

Si el lector viviera en el siglo XIX, los rasgos de su personalidad (ambición, ternura, ingenio o valor) podrían haber sido juzgados en razón del tamaño y la forma de su cráneo. La frenología, así se llamaba ese proceder, fue desarrollada por Franz Joseph Gall y Johann Spurzheim en Viena a principios de la mencionada centuria. Los seguidores de este método declaraban que las "facultades" mentales residían en diferentes regiones del cerebro, regiones que serían mayores cuanto más acentuados fueran los rasgos correspondientes. Los frenólogos sostenían también que el cerebro determinaba la forma del cráneo; por tanto, el examen del exterior de la caja craneana detectaría el desarrollo regional del cerebro.

Pese a nuestro fundado escepticismo sobre esas exploraciones del tamaño del cerebro y sus correlatos funcionales, hemos de reconocerle algo de razón a la visión frenológica del mundo: la estructura cerebral constituye un aspecto fundamental de la neurociencia, porque las funciones cerebrales se ejecutan gracias a combinaciones específicas de las regiones implicadas. En animales complejos, el tamaño y la forma del cerebro reflejan una cohorte de procesos evolutivos, genéticos, patológicos, funcionales y de desarrollo, que interactúan para producir un organismo.

En las estructuras nerviosas influyen numerosos factores. En justa consonancia, el estudio del volumen cerebral, o volumetría, ofrece potencialmente enfoques desde perspectivas diversas. En un contexto evolutivo, el estudio comparado del volumen cerebral de diversas especies puede relacionar datos anatómicos, conductuales y ecológicos. Las especies dotadas de un cerebro singular e inesperado, por grande o por pequeño, resultan idóneas para estudiar la influencia de la evolución en el tamaño cerebral. A este respecto, Katharine Milton, de la Universidad de California en Berkeley, ha sugerido que los primates frugívoros mantienen una relación de cerebro a masa corporal que es mayor que esa razón en los primates folívoros. La autora lo atribuye a una mayor exigencia cognitiva que requiere la búsqueda de frutos, dispersos y estacionales, comparada con la búsqueda de hojas, casi siempre al alcance.

La volumetría permite también descubrir patrones de desarrollo intra e interespecíficos, lo que a su vez sugiere hasta qué punto la evolución podría estar limitada por reglas implícitas del desarrollo neurológico.

El estudio de enfermedades neurológicas depende, asimismo, del análisis sistemático del tamaño y la forma cerebrales. Hay niños autistas cuyo tamaño cerebral es mayor de lo habitual. En el polo opuesto, la enfermedad de Alzheimer causa una progresiva atrofia cerebral. En ambos casos, los procesos patológicos que subyacen bajo estas alteraciones se manifiestan a través de cambios en el volumen cerebral. En resumen, los estudios volumétricos constituyen un medio para comprender la función cerebral y un fin en sí mismos.

Las herramientas del cambio

La neuroanatomía ha experimentado una transformación revolucionaria en los últimos 30 años. Ese salto ha sido posible gracias a la introducción de nuevas técnicas de formación de imágenes: tomografía computarizada de rayos X (TC, también llamada tomografía axial computarizada TAC), resonancia magné-

tica (RM) y tomografía de emisión de positrones (TEP). Con estas herramientas, podemos observar la estructura y la actividad del cerebro con un detalle sin precedentes. Para los estudios estructurales y volumétricos, el TAC y la RM revisten una importancia crucial.

La tomografía axial, la primera técnica en desarrollarse, se basa en la dispar absorción de los rayos X por distintos componentes cerebrales; apoyada en ese fenómeno, extrae imágenes de las estructuras intracraneales del sujeto observado. Para sacar una sola imagen, el TAC ha realizado miles de mediciones singulares que se van tomando a medida que la fuente de rayos X describe un círculo alrededor de la cabeza.

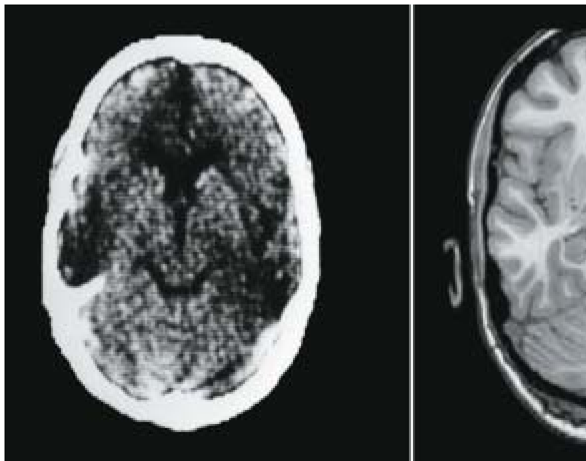
La resonancia magnética recurre a potentes imanes para alinear, de forma transitoria, los núcleos de átomos de hidrógeno de los tejidos del organismo, en su mayoría correspondientes a moléculas de agua. Cuando se desactiva el imán, los núcleos en rotación (o resonancia) tornan a su estado normal, con liberación de energía en forma de ondas de radio. La frecuencia de estas ondas revela la concentración local de hidrógeno, que varía de acuerdo con el tipo de tejido (óseo, adiposo, etcétera). Este proceso genera un mapa muy detallado, no menos fino a menudo que el análisis postmortem. La técnica permite distinguir entre sustancia gris (somas neuronales), sustancia blanca (fibras nerviosas aisladas por mielina grasa, más células de sostén) y líquido cefalorraquídeo, o LCR (el líquido que ocupa las cavidades internas del cerebro y las que lo envuelven). Además, las distintas resonancias magnéticas pueden conjugarse y crear así un modelo virtual tridimensional, que puede luego seccionarse a lo largo de cualquier plano o ángulo.

Trazando líneas

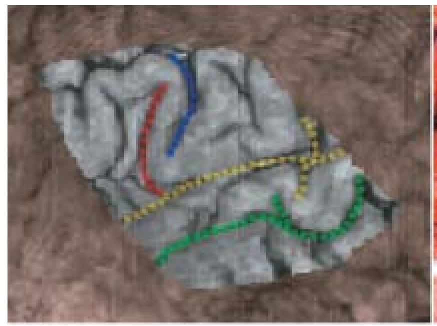
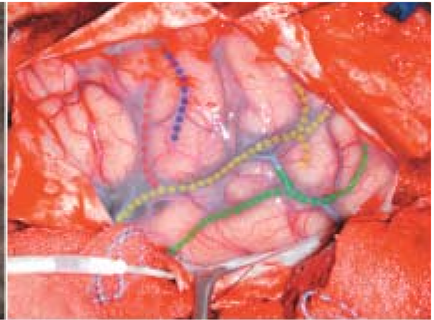
Se llama *parcelación* a la división del cerebro en regiones. Puede acometerse de varios modos, acordes con los objetivos de la investigación y métodos disponibles. En la RM, la parcelación emplea hitos anatómicos visibles —surcos (pliegues) y giros (protuberancias) de la superficie del cerebro— para crear "regiones de interés" (RDI). Abarcan desde extensas divisiones estructurales (los lóbulos temporal, parietal y occipital, por ejemplo) hasta estructuras menores (hipocampo o cuerpo calloso). La localización de actividades cerebrales específicas, cuando se conocen, puede también orientar la parcelación anatómica.

La RM tridimensional se realiza a partir de una serie de imágenes contiguas, tomadas una a una. Un análisis típico de alta resolución puede tener un grosor de corte de 1,5 milímetros; eso significa que un cerebro medio se compilaría con un centenar largo de secciones. Sobre esa base, los programas de procesamiento de imágenes "sacan del cráneo al cerebro" y nos lo presentan como un objeto sólido, que podemos seccionar en cualquier plano, rotarlo o reajustarlo para acomodarlo a un modelo estándar.

Llegados a este punto, podemos redefinir las regiones de interés delimitando el contorno de una estructura de la superficie cerebral. Estas señales se transfieren a cortes "coronales" (paralelos al plano que forma el rostro) para definir la región en cada imagen. Se suma el volumen de la RDI (el área multiplicada por el espesor del corte), de cada sección, para así obtener el valor general. Los estudios ci-

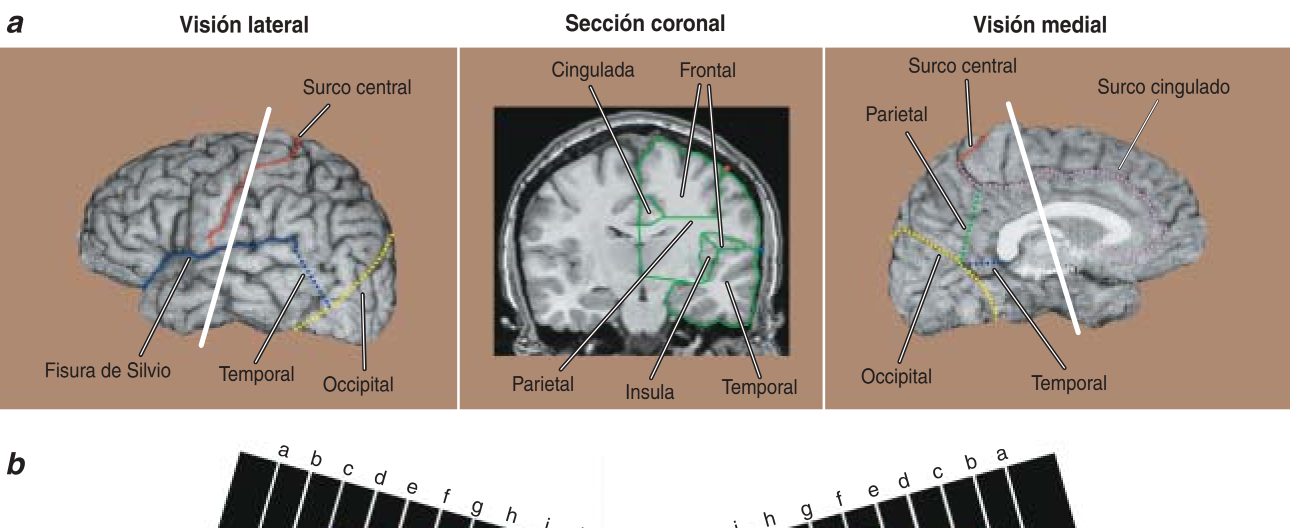


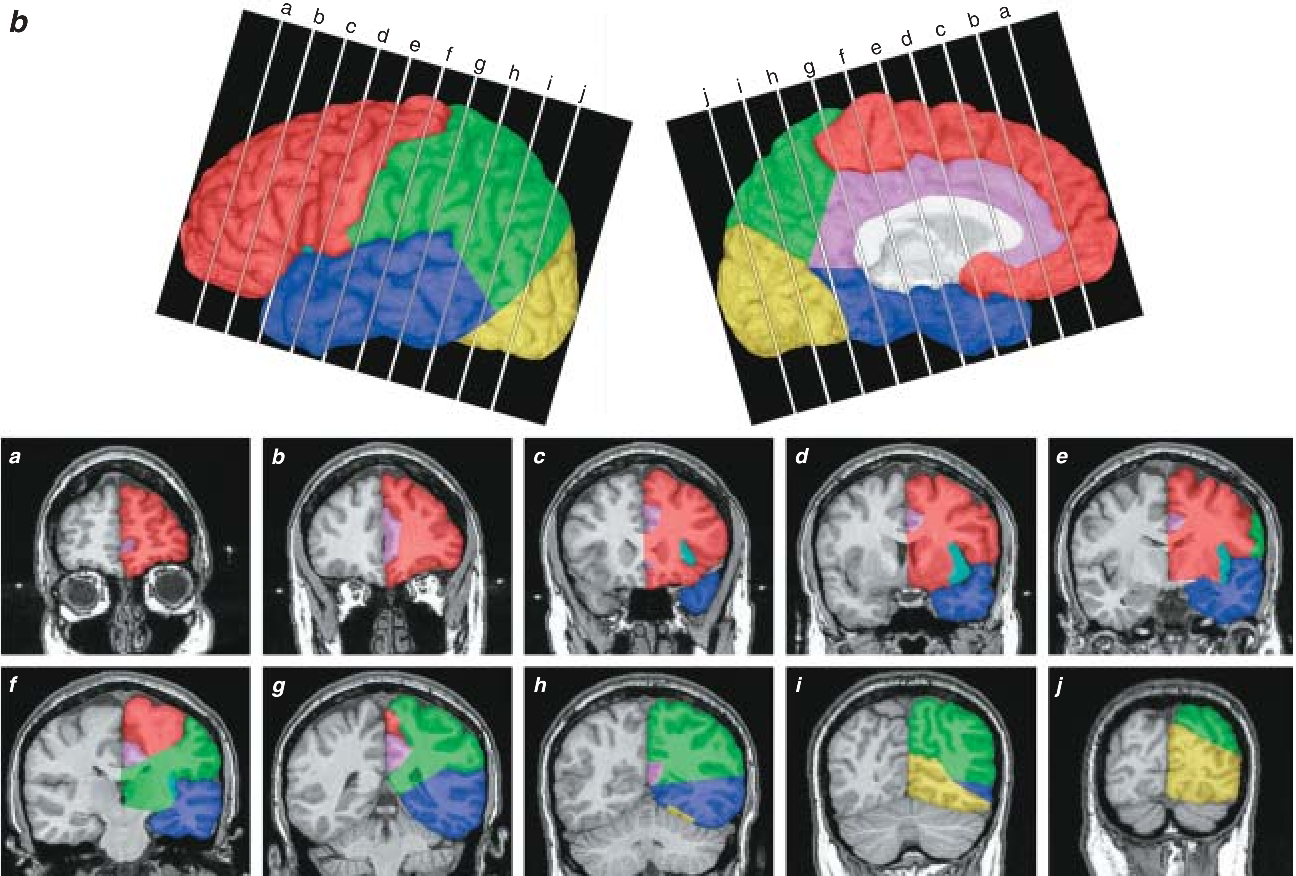

1. LA TECNICA DE LA TOMOGRAFIA COMPUTARIZADA (TC o TAC, *izquierda*) constituyó una auténtica revolución cuando se introdujo en los años setenta. Las imágenes de resonancia magnética (RM, *derecha*) proporcionan una imagen mucho más detallada del cerebro y sus estructuras. Esta técnica permite diferenciar entre sustancia gris, sustancia blanca y líquido cefalorraquídeo (*que aparece en blanco*). La imagen de TAC y la de RM son de sujetos distintos.

2. UNA IMAGEN TRIDIMENSIONAL DE RM (*izquierda*) permite observar un cerebro vivo de forma tan precisa como la visión que se tiene del mismo durante una intervención quirúrgica (*derecha*). En la fotografía de la intervención quirúrgica se indican los principales surcos (pliegues) como sigue: en amarillo la cisura de Silvio, en verde el surco temporal superior, y en azul y rojo dos partes del surco precentral.

CORTESIA DE LOS AUTORES (*arriba*); LOS AUTORES Y MATTHEW HOWARD, UNIVERSIDAD DE IOWA (*abajo*)





3. SE DENOMINA PARCELACION al proceso de dividir una imagen de resonancia magnética en regiones de interés. El proceso se realiza en dos pasos que se muestran en *a*. Se empieza por identificar los surcos y otros puntos de referencia en las superficies externa e interna de un modelo tridimensional del cerebro. En un segundo paso, se delimitan a mano las llamadas "regiones de interés" en secciones coronales generadas por ordenador. Las líneas gruesas blancas indican el plano coronal. La parte *b* muestra un cerebro en el que los lóbulos y la circunvolución cingulada se han marcado en color. Más abajo se muestran 10 secciones coronales (de la *a* a la *j*) que representan menos del 10 % de todas las secciones en las que se ha realizado el trazado manual. El lóbulo frontal está coloreado en rojo, el temporal en azul, el parietal en verde, el occipital en amarillo y la circunvolución cingulada en morado.

CORTESIA DE LOS AUTORES; ADAPTADO POR TOM DUNNE/*American Scientist*

tados en este artículo, y muchos otros en este campo, se han llevado a cabo mediante el laborioso proceso de trazar manualmente en cada imagen las RDI. Se está trabajando sobre métodos para automatizar el proceso, pero ninguno de ellos alcanza todavía la precisión del trazado manual de un experto anatomista.

Por lo que concierne a la representación visual de estructuras cerebrales, la resonancia magnética tiene a su favor la nitidez con que delimita la sustancia gris, la sustancia blanca y el líquido cefalorraquídeo. Se está investigando la razón de materia gris a materia blanca en diversas estructuras, a través de métodos automáticos (aquí sí recomendables) que permiten segmen-

tar imágenes de RM en tales categorías.

Genes y cerebro

Del desarrollo y la evolución del cerebro responden los procesos genéticos subyacentes. Varios grupos de investigación están estudiando los mecanismos genéticos de la estructura y el volumen del cerebro humano. Hay quien opta por basarse en las imágenes de RM para observar el volumen cerebral de mellizos y gemelos. Los resultados abonan la idea de que la capacidad craneana es un rasgo con un fuerte componente hereditario; asimismo, la mayoría de las variaciones en el volumen total o hemisférico pueden atribuirse a factores genéticos.

William Baaré y su grupo, del hospital clínico de la Universidad de Utrecht, sostienen que, en el trabajo por ellos realizado, los genes podían explicar la mayoría de las diferencias de volumen cerebral: el 90 % para el encéfalo en cuanto tal, el 82 % para la sustancia gris y el 88 % para la sustancia blanca.

Hay, sin embargo, un par de importantes características neuroanatómicas que se manifiestan exentas de un control genético estricto. Baaré subrayaba la tenue influencia de la herencia en el tamaño de los ventrículos laterales, cavidades internas del cerebro llenas de líquido cefalorraquídeo. En otro trabajo, Alycia Bartley y su equipo, del Instituto Nacional de Salud Mental de Estados Unidos, declararon que los patrones de surcos y giros evidenciaban entre los mellizos monocigóticos (gemelos) una mayor semejanza que entre los dicigóticos (mellizos distintos). Ahora bien, en ambos grupos los hermanos seguían siendo muy diferentes unos de otros, especialmente en los surcos más pequeños. Así pues, mientras que el volumen global de los principales sectores cerebrales se encuentra bajo un fuerte control genético, las regiones menores pueden ser más sensibles a la influencia del entono. Estas observaciones sobre la contribución respectiva de genes y ambiente al fenotipo son de gran utilidad para comprender la evolución del cerebro humano, otro capítulo de la investigación volumétrica.

Frentes altas sobre cejas bajas

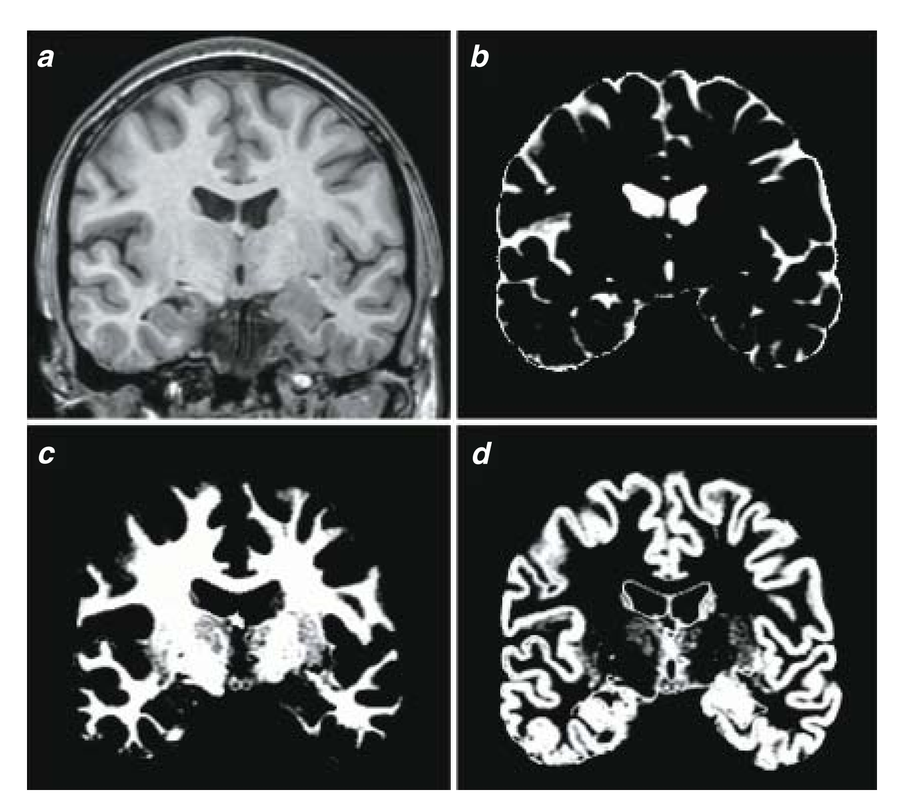
Durante decenios se ha venido debatiendo la hipótesis según la cual la expansión del lóbulo frontal se aceleró en el curso evolutivo de los homínidos. Cuando comparamos nuestra frente alta con la frente inclinada de nuestros parientes vivos más cercanos (los chimpancés) y de nuestros parientes extintos (los neandertales), la hipótesis parece obvia. Las funciones cerebrales en las que el lóbulo frontal desempeña un papel crucial (lenguaje, previsión y juicio) representan diferencias cognitivas importantes entre nosotros y el resto de los animales. Por lo tanto, la idea de que el lóbulo frontal se expandió desproporcionadamente durante la evolución de los homínidos resulta coherente.

La tesis que iguala un lóbulo frontal grande con la inteligencia se halla también muy arraigada en la imaginación popular. Se da por descontado que las facultades mentales se encuentran asociadas a las regiones frontales. Pero, ¿qué hay en ello de cierto?

En investigaciones recientes se han aplicado las técnicas de formación de imágenes al estudio de la expansión relativa del lóbulo frontal en el curso de la evolución de los homínidos. Katerina Semendeferi, hoy en la Universidad de California en San Diego, recurrió a la RM para comparar el tamaño proporcional del lóbulo frontal de los humanos respecto al de otros primates.

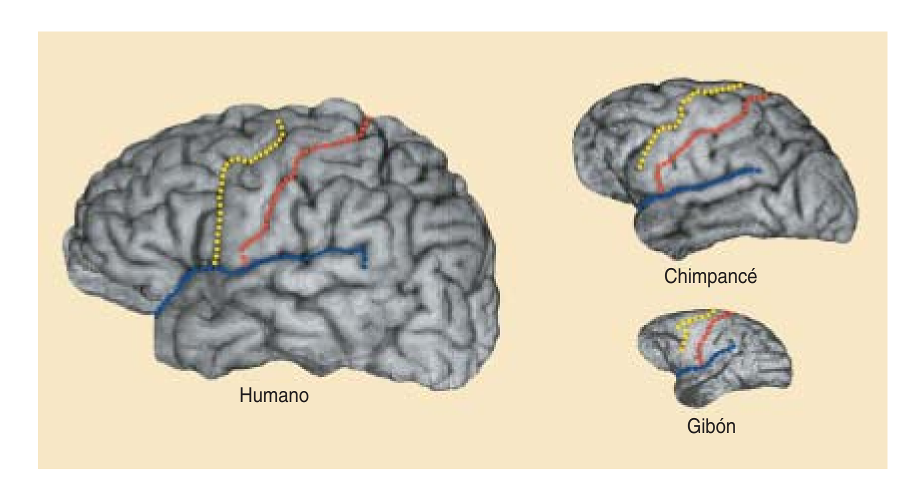
Semendeferi descubrió que la corteza frontal (sustancia gris) y el lóbulo frontal en su integridad (incluidas las sustancias gris y blanca) tenían proporciones relativas muy similares en humanos, orangutanes, gorilas y chimpancés. En estas cuatro especies, el lóbulo frontal considerado en su conjunto comprendía entre un 33 y un 36 % del total del volumen cerebral; la corteza frontal suponía entre un 36 y un 39 % de la sustancia gris cerebral.

Pese a que el cerebro humano viene a triplicar el de un antropoide, los análisis de regresión de



4. LA SEGMENTACION AUTOMATICA de las imágenes de RM es una herramienta muy útil para la determinación del volumen de los diferentes tipos de tejido cerebral. En *a* se muestra la imagen de RM original;, en *b*, *c* y *d*, las imágenes del líquido cefalorraquídeo, de la sustancia blanca y de la sustancia gris, respectivamente, generadas por ordenador.

CORTESIA DE LOS AUTORES/*American Scientist*



5. EL CEREBRO HUMANO es notablemente mayor que el del chimpancé, pero las principales áreas cerebrales tienen proporciones similares, a pesar de las diferencias en la funcionalidad de dichas estructuras. Sin embargo, las proporciones relativas de los cerebros de los humanos y los chimpancés difieren de las que caracterizan a un "primate menor", el gibón. El surco precentral se muestra en amarillo, el surco central en rojo y la cisura de Silvio en azul. Los cerebros están mostrados aproximadamente a la misma escala.

los datos indicaron que la proporción de lóbulo frontal no es mayor de la esperada para un primate con un cerebro del tamaño del nuestro. En cambio, las proporciones de nuestros cerebros son distintas de las que caracterizan a un "primate menor" (gibones de cuerpo pequeño) y de las proporciones de dos especies de monos (mono rhesus y mono capuchino) que tienen lóbulos frontales significativamente menores.

Semendeferi sugiere que la evolución de lóbulos frontales, grandes en proporción, sucedió después de que el linaje de humanos y grandes primates se desgajara del linaje del resto de primates antropoides (hace entre 20 y 25 millones de años), pero antes de la divergencia de los homínidos durante el Mioceno tardío (entre 5 y 10 millones de años atrás). Por tanto, la expansión del lóbulo frontal no constituye una adquisición reciente de los humanos.

Esta investigadora ofrece diversas hipótesis sobre los orígenes del aumento cerebral y del cambio cognitivo en la línea de los homínidos. Estas características pudieron haber surgido tras una reorganización cortical de determinados subsectores del lóbulo, de un aumento de la conectividad entre regiones concretas, de cambios en la citoarquitectura regional o de la combinación de tales procesos. Las pruebas recabadas de la anatomía comparada apoyan las tres posibilidades.

Formación de lóbulos

Nuestro trabajo sobre proporciones de volumen ha abordado también la expansión del lóbulo frontal. Hemos hallado que la variación del tamaño total del cerebro es mucho mayor que la variación de las proporciones de los lóbulos principales. En otras palabras, las personas difieren por el tamaño de su cerebro más que por las razones de proporción entre las principales regiones cerebrales. Esto resulta particularmente evidente si comparamos varones y mujeres. A pesar del cerebro mayor del varón, las relaciones de proporción de los principales lóbulos son similares. En ambos sexos, el lóbulo frontal supone aproximadamente el 38 % de los hemisferios (con una variación entre el 36 y el 43 %); el lóbulo temporal, el 22 % (con una variación entre el 19 y el 24 %); el lóbulo parietal, el 25 % (con una oscilación entre el 21 y el 28 %), y el lóbulo occipital, el 9 % (con una oscilación entre el 7 y el 12 %). Nótese que estos valores divergen ligeramente de los de Semendeferi; tal discrepancia se debe a que el patrón de parcelación aquí incluye más sustancia blanca subcortical.

La comparación del volumen de los lóbulos frontal y parietal ha dado otro giro a la investigación. Según cabía esperar, las personas con lóbulos frontales mayores presentan también lóbulos parietales mayores; ambos reflejan un tamaño cerebral mayor. Sin embargo, después de tener en cuenta las dimensiones globales, descubrimos que existe una correlación negativa significativa entre el volumen del lóbulo frontal y el del lóbulo parietal: las personas con lóbulos frontales mayores tienen lóbulos parietales menores, y viceversa. Puesto que la frontera entre estos dos lóbulos, el surco central, aparece en una fase precoz del desarrollo cerebral, llegamos a la conclusión de que tal relación inversa refleja, a buen seguro, factores genéticos, no factores ambientales. Su curso y posición se hallan estrechamente determinados por la herencia.

La correlación negativa indica que la expansión del lóbulo frontal durante la evolución de los homínidos se produjo, presumiblemente, a expensas de un lóbulo parietal menor. Además, la contracción del lóbulo parietal tiene poco sentido desde un punto de vista cognitivo. Después de todo, las áreas asociativas del lóbulo parietal revisten interés singular para las funciones lingüísticas; asimismo, el uso de herramientas, una peculiaridad distintiva de la evolución de los homínidos, depende de las conexiones entre los lóbulos frontal y parietal. En consecuencia, es posible que haya existido selección *contra* una expansión relativa del lóbulo frontal si ésta comprometía las funciones del lóbulo parietal. A la vista de estas pruebas, el lóbulo frontal crecería al mismo tiempo que otras regiones principales del cerebro, en el transcurso de los dos últimos millones de años.

Una tercera perspectiva sobre la evolución del lóbulo frontal proviene de un estudio con TAC realizado sobre cráneos de varios fósiles de homínidos del último medio millón de años. El grupo encabezado por Fred Bookstein, de la Universidad de Michigan, comparó los cráneos de homínidos extintos con el del hombre moderno. Los miembros arcaicos del género *Homo*

CORTESIA DE LOS AUTORES Y KATERINA SEMENDEFERI, *Universidad de California en San Diego/American Scientist*

alcanzan una capacidad craneana igual o superior a la del moderno *Homo sapiens sapiens*. Sin embargo, los huesos del cráneo y rostro son muy gruesos y robustos; la mayoría presenta arcos supraciliares prominentes, así como cierto grado de prognatismo mesofacial (nariz protuberante), rasgos que, sumados, dan la impresión de una frente baja e inclinada.

Pese a tales diferencias externas, Bookstein mostró, mediante el recurso al *análisis de Procusto*, que el interior de la bóveda craneana era idéntico. Este método estadístico utiliza una serie de intervalos flotantes entre puntos de referencia anatómicos fijos para estandarizar la medición de tamaño, posición, orientación y, finalmente, forma. (Procusto fue un salteador de la mitología griega que forzaba a sus víctimas a acostarse en una misma cama, independientemente de su estatura; para ello mutilaba o estiraba a sus víctimas según fuera necesario.) Los autores determinaron que la forma interior del hueso frontal (y presumiblemente la forma del propio lóbulo frontal) no ha experimentado alteración en los últimos 500.000 años, pese a los cambios sustanciales en la morfología exterior del rostro.

Sexo en el cerebro

De los estudios postmortem y del análisis de las imágenes de resonancia magnética se desprende que, en promedio, el cerebro del varón es mayor que el de la mujer, incluso después de aplicar una corrección según el peso corporal. Al parecer, no se trata de un dimorfismo recién adquirido, puesto que otros primates siguen patrones similares. Pero el tamaño no es la única diferencia. Todo indica que la mujer tiende a tener una proporción de sustancia gris mayor que el varón.

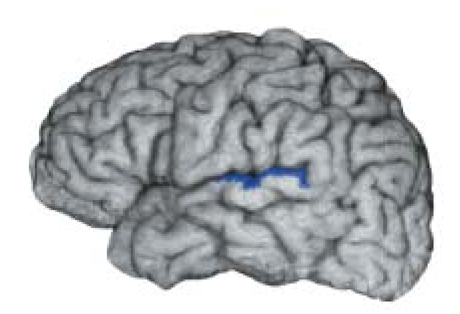
Hemos hecho ya públicos nuestros resultados del examen de las diferencias entre estructuras cerebrales de hombres y mujeres. En promedio, los cerebros masculinos (1241 centímetros cúbicos de media) son aproximadamente un 12 % mayores que los femeninos (1100 centímetros cúbicos de media), con un solapamiento considerable entre los dos grupos.

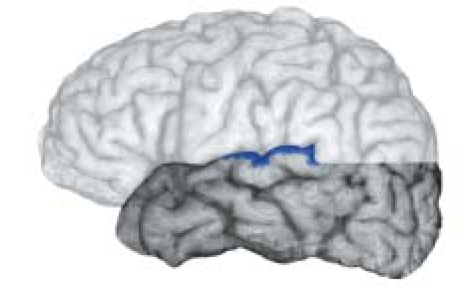
La disparidad apreciada no parecía implicar diferencias ligadas al sexo en el volumen hemisférico, puesto que la mayoría de los varones y mujeres poseían hemisferios derechos mayores que los izquierdos. En general, las diferencias sexuales en cada uno de los lóbulos cerebrales reflejaban las diferencias del cerebro considerado en su globalidad. Sin embargo, el lóbulo occipital, que procesa la información visual, presentaba un dimorfismo sexual menor que otras estructuras.

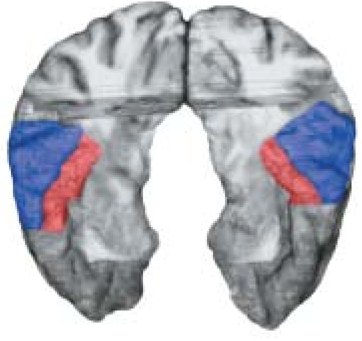
Nuestra segmentación del cerebro en sustancias gris y blanca reveló que las mujeres tenían una proporción media de materia gris a materia blanca de 1,35; en los varones era de 1,26. Tal proporción mayor en las mujeres parece causada por una menor cantidad de sustancia blanca, y no por una mayor cantidad de sustancia gris. Los hombres tenían, en promedio, un 9,3 % más de sustancia gris que las mujeres, pero el incremento en el volumen de sustancia blanca era casi dos veces mayor (17,4 %). Cuando analizamos la covarianza de este grupo de datos, la diferencia en la proporción desapareció una vez normalizado el volumen de sustancia blanca. De los análisis se desprendía que la variabilidad en el volumen de sustancia blanca había sido el factor de mayor peso en las diferencias entre sexos.

A propósito del dimorfismo sexual, la investigación ha prestado especial atención al cuerpo calloso. Esta banda poderosa de sustancia blanca pone en conexión a los hemisferios derecho e izquierdo. En un comienzo, se sugería que podía ser mayor en mujeres que en varones. Pero hoy se privilegia la tesis opuesta: es mayor en los varones, como reflejo del mayor tamaño global del cerebro masculino. Por nuestra parte, hemos observado que el cuerpo calloso es un 10 % mayor en el varón; sin embargo, en la mujer constituye un porcentaje significativamente mayor del total de sustancia blanca (2,4 % frente a un 2,2 %).

Este detalle apunta una explicación de la mayor proporción de sustancia blanca en el varón. En imágenes de RM, la mayor parte de la sustancia blanca incluye axones mielinizados, células de la glía y vasos sanguíneos. Por el contrario, la sustancia blanca del cuerpo calloso consta, en su mayor parte, de fibras axónicas. Así pues, si el cuerpo calloso refleja la proporción de axones de la sustancia blanca, entonces el varón podría tener más componentes no axonales (glía, vasos sanguíneos) en el conjunto de

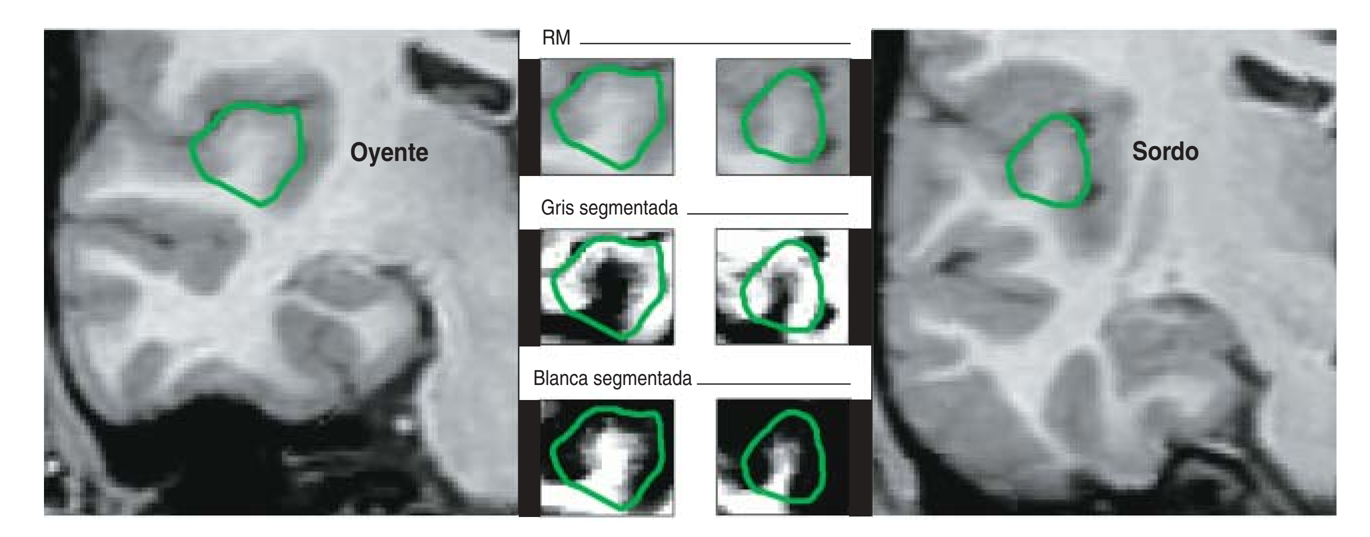






CORTESIA DE LOS AUTORES/*American Scientist*

6. LOS INVESTIGADORES PUEDEN MANIPULAR las imágenes de RM para visualizar estructuras "escondidas" bajo la superficie de la corteza cerebral. En una visión lateral (*izquierda*), el giro de Heschl queda oculto (*rojo*), y el plano temporal (*azul*) apenas es visible a lo largo del borde inferior de la cisura de Silvio. La extracción de los lóbulos frontal y parietal (*centro*) deja al descubierto estas áreas en la superficie superior de cada lóbulo temporal (*derecha*).



7. LAS PERSONAS CON SORDERA CONGENITA presentan menos sustancia blanca que los controles en el giro de Heschl, una región primaria de procesamiento del sonido. El contorno del giro de Heschl se ha destacado en verde. La imagen original de RM se ha segmentado en sustancia gris y sustancia blanca para permitir la comparación.

CORTESIA DE LOS AUTORES; ADAPTADO POR TOM DUNNE/*American Scientist*

su sustancia blanca. En otras palabras, el "exceso" de sustancia blanca en los hombres (subyacente a una proporción menor de sustancia gris a sustancia blanca) no representa probablemente un gran aumento de la conectividad en el cerebro masculino.

Deshaciendo un viejo cliché

¿Qué nos revelan estas diferencias de volumen sobre el funcionamiento real del cerebro de varón y del cerebro de mujer? Cuando, a principios de los años ochenta, se sugirió el dimorfismo sexual del cuerpo calloso, muchos asociaron el "mayor" tamaño de la estructura en las mujeres a un mayor grado de comunicación entre los dos hemisferios. Se remachaba así el estereotipo de que, en la mujer, la mitad derecha "emocional" y la mitad izquierda "analítica" se hallan en un contacto más intenso. Sabemos ahora que la mujer no tiene un cuerpo calloso mayor que el del varón.

En promedio, el cerebro de varón supera en más de 100 centímetros cúbicos el de la mujer. ¿Repercute esa diferencia anatómica en la capacidad cognitiva? No, por varias razones. En primer lugar, pese a que el dimorfismo sexual en cuanto a volumen cerebral persista tras una corrección según el peso corporal, algunas de las variaciones pueden atribuirse a las dimensiones físicas de las personas. En un meticuloso estudio con imágenes de RM (en el que se prestó la misma atención al tamaño cerebral y corporal), Michael Peters y su grupo, de la Universidad de Guelph, encontraron que la diferencia de volumen cerebral entre un sexo y otro disminuía dos tercios cuando se incluía la altura como covariable.

Además, las diferencias de volumen entre sexos siguen una distribución homogénea a lo largo de los lóbulos cerebrales. No existe una región "específica del sexo" con una proporción indebida que pueda explicar la diferencia en el volumen total. Este patrón difuso indica que será difícil encontrar diferencias funcionales que se correlacionen con diferencias en el volumen total. Aún más, existe un patrón similar de dimorfismo sexual en otras especies de primates: las diferencias entre sexos en el volumen cerebral surgieron antes de que se produjeran los profundos cambios en el tamaño cerebral y la cognición que fueron apareciendo en el transcurso de la evolución de los homínidos.

Nuestro rechazo de la interpretación funcional del dimorfismo sexual del volumen cerebral total —pues refleja quizá nuestro origen primate más que la adquisición de adaptaciones cognitivas— no implica que neguemos la existencia de diferencias funcionales-estructurales entre hombres y mujeres en la anatomía cerebral. Al contrario; cabe esperar que los cambios se den de una forma más sutil, en regiones o circuitos cerebrales concretos que estén asociados a conductas específicas que muestren dimorfismo sexual (por ejemplo, las tareas opticoespaciales).

La marca del silencio

El giro de Heschl es una pequeña estructura en la parte superior del lóbulo temporal, enterrada dentro de la cisura de Silvio. Es importante porque marca la posición aproximada de la corteza auditiva primaria, la región cerebral donde se procesan inicialmente los sonidos. Pero, ¿cómo se desarrolla el giro de Heschl en las personas que nunca han oído ningún sonido en su vida?

El examen del giro de Heschl en individuos sordos se relaciona con una serie de estudios, ya clásicos, en animales que evidenciaron la necesidad de la presencia de información sensorial durante períodos cruciales del desarrollo del sistema nervioso. Cuando se bloqueaba la aferencia de información sensorial a los animales (por ejemplo, tapándoles un ojo), no se desarrollaban las estructuras cerebrales que reciben esas proyecciones. Ni que decir tiene que ese tipo de experimentos no puede realizarse en humanos. Y de hecho disponemos de escasa información directa sobre el efecto de la privación sensorial sobre el desarrollo del cerebro humano. En busca de una salida,

colaboramos con Karen Emmorey, del Instituto Salk, para estudiar, mediante imágenes de RM de alta resolución, los volúmenes de las sustancias gris y blanca en el giro de Heschl de individuos con sordera congénita y en individuos de audición normal.

Medimos el volumen del giro de Heschl y de otras regiones en cerebros de 25 individuos con sordera congénita y en 25 controles, de igual sexo y edad que los anteriores. Una de estas áreas, el plano temporal, bordea el giro de Heschl y está implicada en el procesamiento secundario del sonido. Esta estructura constituye una de las regiones más asimétricas del cerebro, siendo mayor en el hemisferio izquierdo que en el derecho. Antaño se pensó incluso que esta asimetría podía haber evolucionado con el lenguaje hablado. Pero encontramos un patrón similar en los chimpancés; por tanto, las funciones lingüísticas de los hemisferios debieron haberse desarrollado en el contexto de una lateralización preexistente (al menos en esta área).

El plano temporal fue igual en los sujetos sordos y oyentes. De eso se desprendía que la estructura de esta región no parece venir condicionada por la entrada de información sensorial. Sin embargo, en el giro de Heschl sí observamos diferencias: la razón de sustancia gris a sustancia blanca era bastante mayor en los sujetos sordos que en los controles. El aumento obedecía a una reducción del volumen de la sustancia blanca, puesto que la cantidad de sustancia gris (después de la normalización) varió muy poco entre los sujetos sordos y de audición normal.

Creemos que la privación auditiva desde el nacimiento puede haber conducido a una combinación de una menor mielinización, número menor de conexiones con la corteza auditiva y una desaparición gradual de las fibras axonales en desuso. Esta parte del cerebro no está muerta, pues responde a estímulos no auditivos. Pero nuestros resultados indican que la exposición al sonido podría repercutir en el desarrollo anatómico de esta región sensorial primaria.

Llenando el vacío

Dada la complejidad de la cuestión y el número de aspectos que deben ser investigados, los estudios volumétricos del cerebro humano se encuentran todavía en sus inicios. Ni siquiera hemos establecido el rango de variabilidad del cerebro humano. Se necesita más investigación normativa. A pesar de que las imágenes de RM han sido utilizadas en cientos de estudios sobre esquizofrenia, la enfermedad de Alzheimer y el autismo, la información volumétrica no constituye aún un componente estándar en la diagnosis clínica. Confiamos en que la próxima generación de trabajos de RM de alta resolución añadirán más capacidad analítica para ahondar en la vinculación entre estructura y función cerebral.

Los autores

John S. Allen enseña en el departamento de neurología de la facultad de medicina de la Universidad de Iowa, en cuyo laboratorio de neuroanatomía y neuroimagen investiga **Joel Bruss**. **Hanna Damasio**, directora de dicho laboratorio, comparte esa tarea con la docencia universitaria.

Bibliografía complementaria

HUMANS AND GREAT APES SHARE A LARGE FRONTAL CORTEX. K. Semendeferi, A. Lu, N. Schenker y H. Damasio en *Nature Neuroscience*, vol. 5, págs. 272-276; 2002.

SEXUAL DIMORPHISM AND ASYMMETRIES IN THE GRAY-WHITE COMPOSITION OF THE HUMAN CEREBRUM. J. S. Allen, H. Damasio, T. J. Grabowski, J. Bruss y W. Zhang en *NeuroImage*, vol. 18, págs. 880-894; 2003.

A MORPHOMETRIC ANALYSIS OF AUDITORY BRAIN REGIONS IN CONGENITALLY DEAF ADULTS. K. Emmorey, J. S. Allen, J. Bruss, N. Schenker y H. Damasio en *Proceeding of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol. 100, págs. 10.049-10.054; 2003.

Brechas en la defensa antimisil

Es dudosa la eficacia del sistema defensivo antimisiles desplegado por los Estados Unidos

Richard L. Garwin

Fotografía de Paul Shambroom

La Agencia de Defensa Antimisil (MDA, "Missile Defense Agency") del Pentágono ha instalado en los últimos meses seis cohetes interceptores —diseñados para alcanzar misiles balísticos en pleno vuelo— en silos emplazados en Fort Greely (Alaska). En el momento en que se cerraba este número, se acababa de instalar otro en la base aérea de Vandenberg (California). Está previsto que para finales de 2005 se hayan desplegado algunos misiles más en ambos lugares. [El 15 de diciembre, una prueba de este sistema de intercepción fracasó. Se desconoce aún cómo afectará a los planes.] En el transcurso de los próximos años, la MDA pretende reforzar ese rudimentario sistema de defensa en pleno vuelo con más interceptores, radares avanzados y satélites de vigilancia. Tal despliegue pretende contrarrestar la amenaza de ataques con armas nucleares o biológicas lanzadas mediante misiles balísticos intercontinentales (ICBM) por algún enemigo potencial (Corea del Norte o Irán).

Pero, pese a los más de 80.000 millones de dólares invertidos en el escudo antimisil estadounidense desde 1985, este sistema no podrá ofrecer una defensa sólida durante muchos años, si es que lo consigue algún día. Las presiones políticas por afirmar la seguridad de EE.UU. frente al ataque de un enemigo potencial han desembocado en un sistema de defensa incapaz de responder ni siquiera a las amenazas más inmediatas, procedentes de las potencias misilísticas emergentes. El sistema de ataque en pleno vuelo de la MDA está construido para interceptar misiles de largo alcance disparados a miles de kilómetros de EE.UU., pero nada puede hacer para detener un misil de corto o medio alcance lanzado desde un barco frente a las costas estadounidenses. Lo que es más, es probable que dichos cohetes interceptores no resulten eficaces ni siquiera contra los misiles de largo alcance, puesto que el enemigo podría fácilmente equipar sus ICBM con sencillas contramedidas, harto efectivas para burlar el actual sistema de defensa.

La necesidad de un sistema de defensa antimisiles robusto resulta incuestionable. La capacidad destructiva de las ojivas nucleares es tan atroz, que sería irresponsable no desarrollar procedimientos para evitar su alcance. Pero, en vez de apresurarse a desplegar un sistema ineficaz, más valdría que los estados mayores y los políticos se dedicaran a evaluar la magnitud de las

amenazas y a estimar la capacidad de las estrategias defensivas propuestas. El Pentágono debería centrarse en los misiles de crucero y balísticos de corto y medio alcance, peligros éstos más próximos. Los fondos que se dedican al actual sistema de defensa en pleno vuelo de la MDA deberían destinarse al desarrollo de programas alternativos con posibilidades reales de detener un ICBM.

Lo esencial de la defensa antimisil

Los sistemas de interceptación de misiles se agrupan en tres categorías básicas: terminal, en fase de propulsión y en pleno vuelo. La defensa terminal tiene por objeto detener la ojiva en la fase final de su trayectoria, cuando se halla a menos de un minuto de distancia del blanco; reviste suma importancia asegurar que la interceptación se produzca antes de que la ojiva esté tan cerca del objetivo que termine por dañarlo. Por tanto, proteger los edificios y habitantes de una ciudad entraña mayor dificultad que conservar misiles en silos de hormigón endurecido para contraatacar al primer envite (y disuadir así al enemigo). Para defender un núcleo urbano, los interceptores deben excluir de la explosión nuclear un área más extensa y destruir la ojiva a una altitud mayor. Además, puesto que una ciudad resulta harto más valiosa que un silo de misiles, la fiabilidad de la interceptación debe ser también mayor.

Por dar cifras: una cabeza nuclear de un megatón debería interceptarse a una altitud mínima de 10 kilómetros para evitar que el calor de la bomba de hidrógeno incinerase la ciudad. Asimismo, el cohete interceptor no podría lanzarse hasta que la ojiva penetrase en la atmósfera; sólo así el sistema de defensa podría distinguir entre el arma verdadera y los señuelos inocuos que la acompañan. Tantas limitaciones se traducen en que los interceptores no pueden emplazarse a más de 50 kilómetros de la población. Así, a menos que el Pentágono esté preparado para alfombrar el país de interceptores, resulta manifiesto que la defensa terminal no ofrece una respuesta adecuada a la amenaza que supondrían unos cuantos ICBM con carga nuclear. Incluso el despliegue de un escudo antimisil hermético de varias ciudades implicaría dejar otras al descubierto y, por tanto, convertirlas en blanco de fácil alcance.



1. UN MISIL MINUTEMAN MODIFICADO operó como cohete interceptor en una serie de controvertidos ensayos del sistema estadounidense de defensa antimisiles entre 1997 y 2002. Disparados desde el atolón de Kwajalein, en el Pacífico central, los interceptores destruyeron las falsas ojivas en cinco de los ocho intentos. Sin embargo, se trataba de una simulación del ataque de misiles balísticos poco realista.

En el caso de la interceptación en fase de propulsión, el misil debe inutilizarse durante los primeros minutos de su vuelo, cuando todavía está ascendiendo. Ello se traduce en complejas exigencias técnicas para el interceptor. Tras despegar, un ICBM

típico describe un arco ascendente con una aceleración media de unas tres *g* (tres veces la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre), alcanzando una velocidad de siete kilómetros por segundo en 250 segundos. Supongamos que el interceptor dispone de 200 segundos para atrapar al ICBM (es decir, que se lanza después de menos de un minuto del despegue del ICBM) y que debe recorrer 500 kilómetros desde su base hasta impactar contra el misil enemigo. Para cubrir esa distancia debería desplazarse con una aceleración constante de unas 3,5 *g* durante los 100 primeros segundos y a una velocidad tras el apagado del cohete de 3,33 kilómetros por segundo durante los 100 segundos siguientes. Si el interceptor necesitara volar 1000 kilómetros, debería doblar la aceleración y la velocidad de extinción.

Para derribar ICBM lanzados desde cualquier punto de Corea del Norte, los interceptores en fase de propulsión apostados frente a la costa de este país o en una nación vecina, deberían recorrer hasta 1000 kilómetros, por lo que necesitarían una velocidad tras el apagado de seis a ocho kilómetros por segundo. Para derribar misiles lanzados desde Irán, sin embargo, dado que se trata de un país más extenso, los interceptores requerirían velocidades tras el apagado de unos 10 kilómetros por segundo. Puesto que deben alcanzar esa velocidad en tan sólo 50 segundos, deberían mantener una aceleración media de 20 *g*. El ejército norteamericano ya tiene experiencia en este tipo de interceptores; en los años sesenta, ensayó un pequeño misil que alcanzaba en pocos segundos una aceleración media de 260 *g*. La interceptación en fase de propulsión se muestra más prometedora que el láser aerotransportado, una plataforma de defensa alternativa que intentaría inutilizar los ICBM enfocándolos con haces de láser durante su ascenso. De construcción y operación carísimas, este láser a bordo de aviones resultaría inútil para derribar misiles a distancias superiores a 300 kilómetros.

La interceptación en fase de propulsión entraña mayores dificultades cuando se trata de ICBM lanzados desde China o Rusia. Esos países son tan vastos que los interceptores apostados frente a la costa no lograrían alcanzar los misiles durante su ascenso. Los interceptores deberían instalarse en órbita, con el consiguiente incremento de los costes.

Aunque los interceptores espaciales en fase de propulsión formaban parte de la Iniciativa de Defensa Estratégica original, propuesta hace veinte años por el presidente Reagan, a finales de los noventa el Pentágono decidió centrar su atención en los sistemas de interceptación en pleno vuelo, concebidos para destruir la ojiva del misil mientras éste se halla por encima de la atmósfera, abalanzándose sobre la tierra desde el vértice del arco de su trayectoria. Por esta razón, el sistema de defensa antimisil que está desplegando la MDA constituye la técnica más madura, pero no la más eficaz.

Destrucción por impacto

¿Cómo operaría el sistema defensivo de la MDA? Para empezar, cualquier lanzamiento de un ICBM contra EE.UU. sería descubierto mediante satélites militares que detectan la llamarada del motor de los cohetes. En servicio desde los años setenta, esos satélites del Programa de Apoyo a la Defensa (DSP, de "Defense Support Program") están situados en órbitas geosíncronas a 36.000 kilómetros por encima de la Tierra —dado que su período orbital es de 24 horas, permanecen fijos sobre su punto del ecuador. En conjunto, los satélites observan casi la totalidad del planeta en la zona infrarroja del espectro; ello les permite detectar el lanzamiento de cualquier misil balístico de tamaño y alcance considerables. Cada uno barre la superficie terrestre cada 10 segundos; deducen así la ubicación del ICBM con una precisión de un kilómetro, desde el momento en que el misil atraviesa la capa de nubes a una altura de unos 10 kilómetros hasta la extinción del cohete de 200 a 300 segundos después. En algunas zonas de la Tierra, el DSP ofrece cobertura estereográfica.

El sistema de la MDA dispararía varios interceptores contra cada misil para derribarlo en pleno vuelo, mucho después de que el motor de aquél se hubiera apagado y su ojiva nuclear separado del cohete propulsor. La interceptación tendría lugar en el vacío espacial, a cientos de kilómetros de la superficie terrestre; el blanco sería la ojiva, que se encierra en un vehículo que la protege del calor abrasador producido durante la reentrada en la atmósfera. Puesto que los interceptores necesitan conocer la posición exacta de su objetivo y requieren tiempo para dirigirse hacia la ojiva, y los satélites del DSP no pueden detectar un misil tras la extinción del motor de su cohete, la interceptación en pleno vuelo requiere un radar que siga la trayectoria del misil con gran precisión.

Para cubrir las trayectorias del Pacífico Norte —las que con mayor probabilidad utilizarían los ICBM norcoreanos—, en un principio el Pentágono planeó asentar una estación de radar avanzada, en el extremo de la cadena de islas Aleutianas, en Alaska. Pero el mar embravecido y el viento huracanado que reinan en aquella zona difi-

Resumen/Sistema de defensa antimisiles

- El actual sistema estadounidense de defensa antimisiles se basa en interceptar los misiles balísticos intercontinentales cuando éstos se hallan en pleno vuelo, mientras la ojiva empieza a precipitarse sobre la Tierra, a centenares de kilómetros de su superficie.
- El punto más débil de este sistema de defensa es la facilidad con que el enemigo podría burlarlo. Cargando cada misil balístico con docenas de señuelos, por ejemplo, los interceptores quedarían desbordados en poco tiempo, puesto que no conseguirían discriminar entre éstos y la ojiva.
- Mayor eficacia ofrece la destrucción de los misiles balísticos mientras ascienden. Asimismo, EE.UU. debería desplegar un sistema de defensa contra misiles de corto y medio alcance, disparados desde buques amarrados frente a las costas del país.

cultaron la construcción *in situ*. En la actualidad, la MDA está construyendo dicho radar, de 900 millones de dólares, en una plataforma flotante frente a la costa de Texas. A su terminación, prevista para finales del año en curso, se remolcará hasta su emplazamiento operativo cerca de la cadena Aleutiana. (Hasta entonces, el sistema de la MDA dependerá del radar Cobra Dane de alerta precoz que la Fuerza Aérea tiene en la isla Sheyma.) El nuevo radar emitirá microondas en la banda X del espectro. Con una longitud de unos tres centímetros, esas ondas son más cortas que las empleadas por los radares al uso. Permiten estrechar el haz del radar, de forma que éste apunta con mayor exactitud a la ojiva del misil en medio de la "nube amenazadora". Además de la última etapa del cohete, ésta incluye, con toda probabilidad, docenas de globos hinchables ideados para remedar la ojiva y engañar así al radar e incluso a sensores de espectro visible o infrarrojo.

Por supuesto, el nuevo radar de banda X instalado en la vecindad de las Aleutianas resultaría del todo inútil para proteger EE.UU. de los ICBM lanzados desde Irán, que sobrevolarían Europa y el Atlántico norte. La MDA planea corregir esa deficiencia durante los próximos años con el despliegue de una red más extensa de sensores e interceptores.

Por fin, el sistema del DSP será remplazado por un nuevo sistema espacial infrarrojo de satélites en órbitas geosíncronas que proporcionarán un mejor seguimiento de los ICBM durante su ascenso. Además, el Pentágono está desarrollando una constelación de satélites de órbita terrestre baja, capaces de seguir los misiles durante la fase de pleno vuelo mediante sensores infrarrojos y de luz visible. La red de comunicaciones que enlaza satélites, radares e interceptores con el centro de mando y control en las montañas Cheyenne (Colorado) también se modernizará por etapas.

Los primeros sistemas de defensa antimisil —el Safeguard, empleado por EE.UU. a mediados de los setenta para proteger 150 silos de ICBM en Dakota del Norte, y el sistema ruso de defensa de Moscú, aún operativo— dependían de interceptores equipados con dispositivos nucleares diseñados para detonar cuando se encontraran lo bastante cerca del misil enemigo como para destruirlo. Pero los sistemas de guiado se han perfeccionado tanto en los últimos decenios, que los interceptores están ya capacitados para destruir los misiles balísticos simplemente colisionando con ellos. Esta técnica elude la necesidad de recurrir a detonaciones nucleares, en el espacio o en la atmósfera, que trastornarían las comunicaciones y conllevarían riesgos ambientales. En el sistema de la MDA, cada interceptor cuenta con un vehículo destructor, una carga útil que se sirve de sensores infrarrojos para encaminarse hacia la ojiva del ICBM. Cuando el destructor se ha acercado y la ojiva queda ya en el campo de visión del sensor, se orienta para la colisión mediante pequeños propulsores laterales. El Pentágono ha mostrado la eficacia de la destrucción por impacto en varios ensayos desde 1999; sin embrago, la MDA y algunos críticos coinciden en que las representaciones que el Departamento de Defensa ha utilizado para simular el ataque de misiles balísticos eran poco realistas.



2. UN PROTOTIPO DE RADAR DE BANDA X emplazado en el atolón de Kwajalein se empleó en las pruebas del sistema estadounidense de defensa antimisiles para seguir las falsas ojivas. Dada la limitada capacidad de rastreo del prototipo, los interceptores recibían también datos de posición procedentes de balizas de radar instaladas en las ojivas.

PAUL SHAMBROOM *nukephoto.com*

En la técnica de destrucción por impacto, la velocidad de aproximación en la interceptación es tan elevada, que el vehículo destructor resulta devastador, un verdadero proyectil. Aun en el caso de un vehículo destructor estacionario, si chocase con una ojiva de ICBM que viajase a siete kilómetros por segundo se liberaría una tremenda descarga de energía cinética: casi 25 millones de joules por cada kilogramo de masa del vehículo. En cambio, la densidad energética de un alto explosivo es sólo de unos cuatro millones de joules por kilogramo. Por tanto, añadir explosivos al vehículo destructor resulta del todo innecesario. Mejor sería añadir sistemas de guiado perfeccionados que aumentaran la probabilidad de acertar en el blanco.

Contramedidas

El sistema de defensa antimisiles se enfrenta a un adversario tenaz. Redundaría en perjuicio de la seguridad cualquier sistema que no tuviera en cuenta la aplicación de contramedidas por parte del enemigo. Sencillas y efectivas, existen varias formas de anular un escudo antimisiles. Por ejemplo, reducir la señal que el misil balístico y su ojiva producen en los radares y sensores infrarrojos para dificultar el direc-

Misil contra misil

El sistema norteamericano de interceptación en pleno vuelo está configurado para destruir ojivas agresoras cuando todavía se hallan por encima de la atmósfera terrestre.

Satélite del Programa de Apoyo a la Defensa

Ojiva y señuelos

Vehículo destructor

1 DETECCION DEL LANZAMIENTO
Uno de los satélites en órbita geosíncrona del Programa de Apoyo a la Defensa detecta la llamarada de un ICBM lanzado desde Corea del Norte. El satélite le sigue el rastro hasta que su cohete propulsor se extingue de 200 a 300 segundos después del lanzamiento.

Desprendimiento del propulsor

2 RASTREO DEL MISIL
Cuando el misil se desprende de los cohetes propulsores y libera la nube amenazadora (ojiva y señuelos), el radar se hace cargo del rastreo. En la actualidad, el sistema depende del radar Cobra Dane de alerta precoz, situado en la isla Sheyma (Alaska). Se espera que un radar más avanzado de banda X se remolque hasta un emplazamiento marino a finales de 2005.

3 INTERCEPCION DE LA OJIVA
Los datos del radar guían los vehículos destructores, lanzados desde Alaska y California, hacia la nube amenazadora. Los sensores de infrarrojos de los destructores deben distinguir con precisión las ojivas de los señuelos y seguidamente orientar el artefacto en rumbo de colisión.



Radar Cobra Dane
Isla Shemya, Alaska

RUSIA

ICBM

CHINA

Base de lanzamiento del ICBM



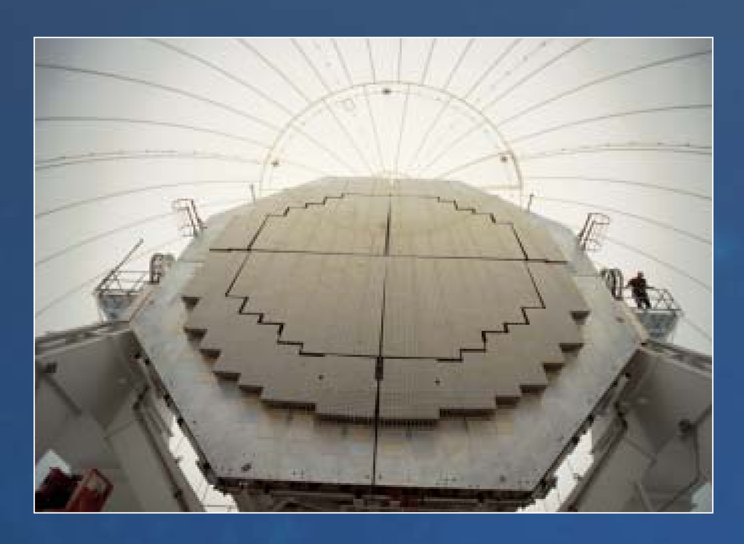
COREA DEL NORTE

JAPON

Radar de banda X
Plataforma marina

Océano Pacífico

RADAR DE BANDA X
Puesto que el sistema de interceptación debe rastrear con gran precisión ojivas y señuelos, se utiliza un radar de banda X. Su estrecho haz permite distinguir objetos separados por tan sólo 15 centímetros. Sin embargo, en el caso de que las ojivas y los señuelos se oculten en el interior de globos aluminizados refringentes al radar, puede que el sistema sea incapaz de determinar cuál es cada uno. El nuevo radar, con una superficie (*derecha*) de 12 a 15 metros de ancho, se sustentará sobre una plataforma flotante del tamaño aproximado de dos campos de fútbol americano.





VEHICULO DESTRUCTOR
Construido por Raytheon, el vehículo destructor pesa unos 64 kilogramos y mide unos 160 centímetros de largo y 60 centímetros de diámetro. Su buscador infrarrojo, diseñado para guiar el vehículo hacia el blanco en los últimos segundos antes de la interceptación, está unido a un telescopio (*parte superior de la fotografía de la derecha*). El vehículo cuenta con cuatro propulsores laterales que ajustan el rumbo.



CENTRO DE MANDO
El mando y control del sistema de interceptación se instalará en el Centro de Operaciones que la Fuerza Aérea estadounidense tiene en las montañas Cheyenne, junto a Colorado Springs. Durante las pruebas del sistema de defensa antimisiles, oficiales de estado mayor observaron las operaciones desde una sala de control en el atolón de Kwajalein (*abajo*).



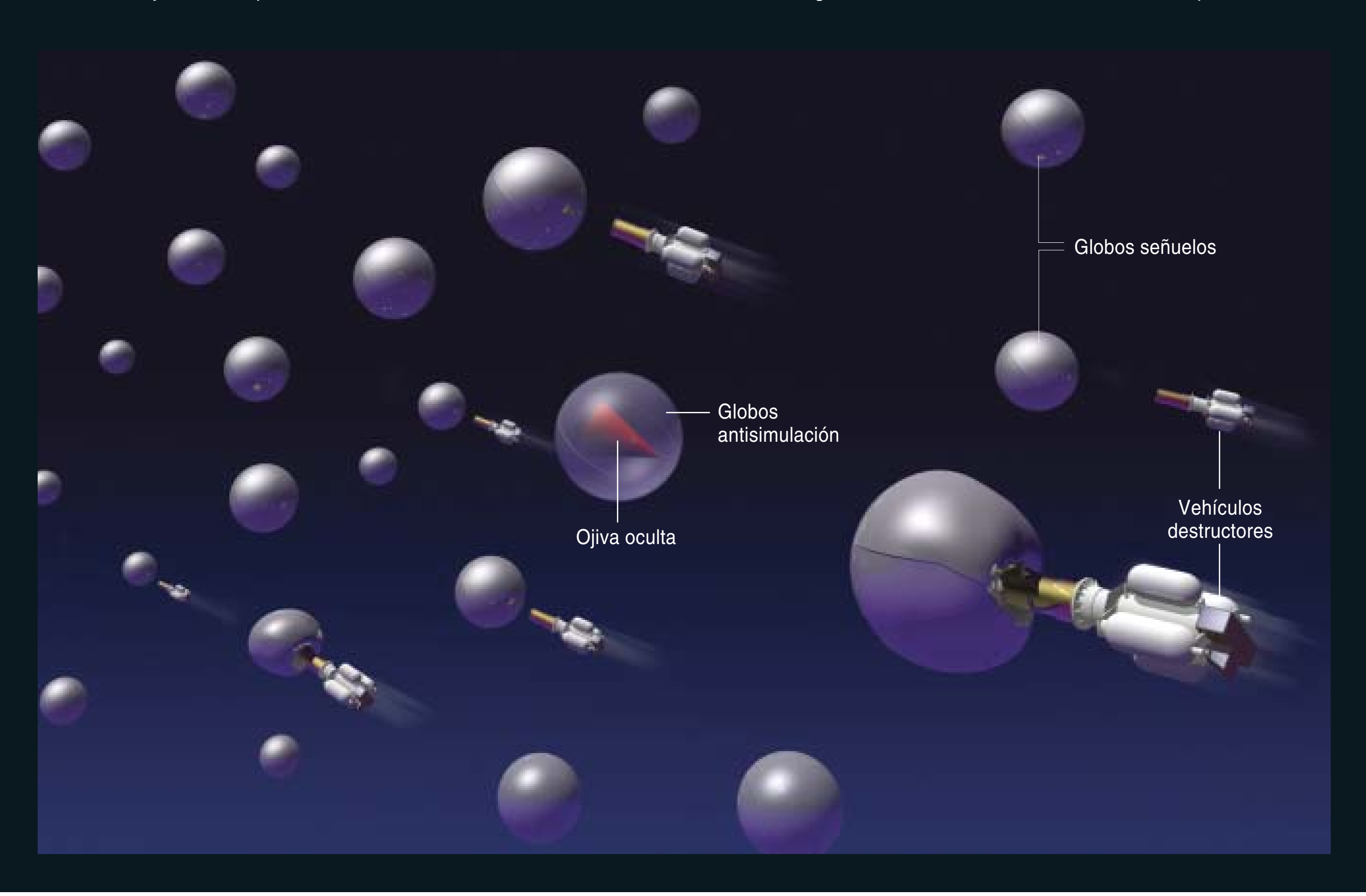


COHETE INTERCEPTOR
El primer propulsor del interceptor, un cohete de tres etapas de 17 metros de largo, se instaló en julio de 2004 en el silo de Fort Greely (Alaska). Allí mismo se desplegarán pronto un total de seis interceptores y diez más a finales de 2005. En la base aérea de Vanderberg (California) se emplazarán cuatro.

ALFRED T. KAMAJIAN; AGENCIA DE DEFENSA ANTIMISIL (*cohete interceptor*)

Las contramedidas

El talón de Aquiles del actual sistema de defensa antimisiles estriba en la disponibilidad de contramedidas. Hasta potencias misilísticas poco desarrolladas, como Corea del Norte e Irán, podrían equipar sus ICBM con globos señuelo que remedan la ojiva. Esta podría incluso ocultarse en el interior de un globo antisimulación para aumentar la eficacia del camuflaje Cada señuelo contendría un pequeño calefactor para que los sensores infrarrojos no los descubrieran. El sistema de defensa se vería obligado a disparar contra todos los señuelos, agotando así las existencias de interceptores.



cionamiento de los interceptores; ello se logra colocando la ojiva en un vehículo de reentrada, de forma cónica aguzada, forrado de material refringente al radar, que merma de forma notable la visibilidad de un radar de banda X. Asimismo, puede enfriarse el revestimiento opaco de la ojiva mediante nitrógeno líquido; la torna invisible a los sensores de infrarrojo del vehículo destructor.

Otra contramedida consiste en cargar cada ICBM con docenas de señuelos que remeden la apariencia de la ojiva. Si el ICBM suelta los señuelos y la ojiva al final del vuelo propulsado, el camino que los señuelos livianos definen cuando avanzan por el vacío espacial resulta indistinguible de la trayectoria de la ojiva, dotada de mayor peso. Podrían también colocarse calefactores en los señuelos para que produjeran la misma señal infrarroja que la ojiva. Para facilitar la construcción de dichos señuelos, podría recurrirse a una ojiva antisimulación: un arma disfrazada de señuelo. Dicha ojiva se ocultaría en el interior de un globo aluminizado antirradar del mismo aspecto que el de las docenas de señuelos vacíos. Si los destructores no distinguieran entre ojivas y señuelos, habría que disparar centenares de interceptores y el sistema de defensa antimisiles se desbordaría enseguida.

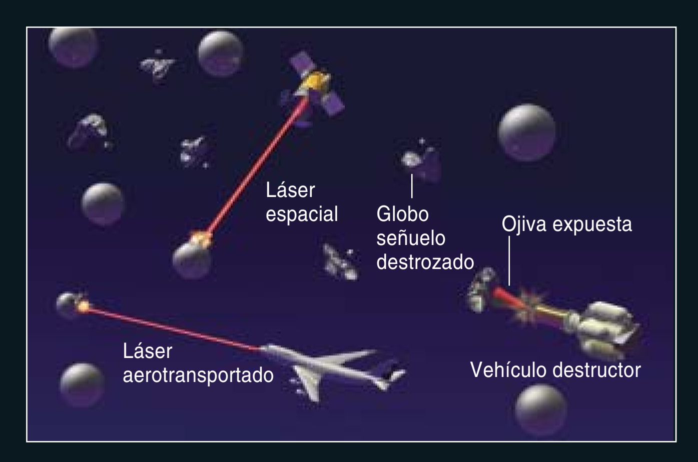
Estas y otras contramedidas, que, dada su simplicidad, están al alcance de cualquier enemigo potencial, constituyen el principal punto débil de la interceptación en pleno vuelo. Los recursos económicos y técnicos necesarios para implantarlas resultan insignificantes comparados con el esfuerzo que se requiere para diseñar, construir y mantener los ICBM. Por desgracia, la "astuta" MDA parte de la suposición de que Corea del Norte (que aún no ha ensayado un ICBM con carga nuclear, si bien la CIA lleva esperando tal ensayo desde 1998) no pondrá en juego ninguna contramedida capaz de vencer a los interceptores estadounidenses. Personalmente, estoy tan convencido de la eficacia de esas contramedidas —en concreto, señuelos y globos antisimulación— que a comienzos de 1999 recomendé encarecidamente a la Organización de Defensa contra los Misiles Balísticos (predecesora de la MDA) que abandonara la defensa en pleno vuelo y

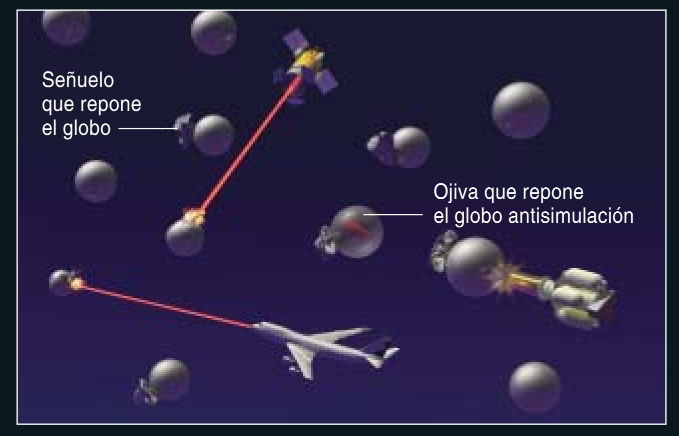
ALFRED T. KAMAJIAN





¿Podría modificarse el sistema de defensa para distinguir entre la ojiva y los señuelos? En última instancia, EE.UU. podría desplegar un interceptor de acción temprana que haría explosión, creando una onda de gas que arrastraría a los señuelos, livianos, pero no al globo con la ojiva, dotada de mayor peso. El radar de banda X detectaría el movimiento y dirigiría otro interceptor hacia la ojiva (*izquierda*). Pero los globos podrían entonces equiparse con pequeños explosivos que los impulsaran en dirección contraria, contrarrestando el empuje antes de que pudiera detectarse cualquier movimiento (*derecha*).





Potentes láseres aerotransportados o instalados en el espacio podrían también reventar uno a uno los globos calentándolos (*izquierda*). Pero el atacante podría frustrar esa defensa diseñando los señuelos y la ojiva de forma que repusieran el globo si el original quedaba inutilizado (*derecha*).

ALFRED T. KAMAJIAN

se concentrara en la interceptación en fase de propulsión.

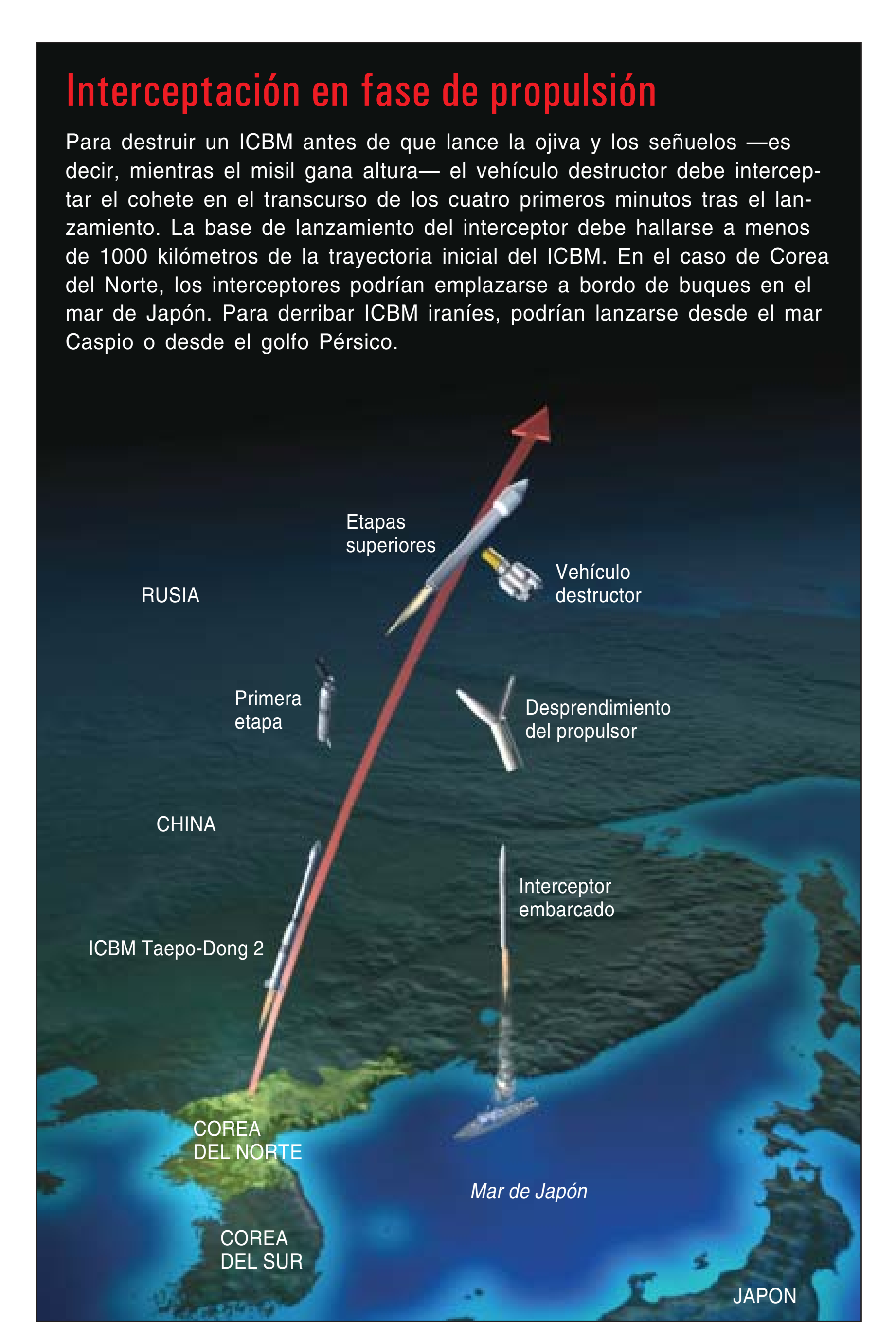
La única forma segura de esquivar las contramedidas es interceptar el misil al comienzo de su vuelo. De nada serviría al atacante lanzar señuelos desde un ICBM mientras el cohete siguiera encendido; no tardarían en quedar atrás y, por tanto, resultarían ineficaces. Tal interceptación podría burlarse con misiles ficticios, diseñados para parecer ICBM portadores de ojivas; sin embargo, dado que cada uno de estos falsos proyectiles debería incorporar al menos dos etapas para resultar creíbles, esta contramedida resultaría demasiado cara. Otra ventaja de la interceptación en fase de propulsión es la posibilidad de evitar el lanzamiento de armas biológicas, contenidas probablemente en centenares de pequeñas bombas que se soltarían desde el ICBM justo después de su ascenso. Dado que esos proyectiles se precipitarían cada uno por separado hacia EE.UU., una defensa terminal o en pleno vuelo sería incapaz de detener el ataque.

Los partidarios del sistema de la MDA han declarado que tienen la intención de incorporar la interceptación en fase de propulsión a la defensa antimisil. Sin embargo, la creación de una defensa estratificada que intercepta los misiles en las distintas fases de su trayectoria no constituye una estrategia necesariamente rentable. Cada escalón defensivo tiene un coste; invertir en la interceptación en fase de propulsión hará mucho más por la seguridad de EE.UU. que emplear los mismos fondos en construir o ampliar el defectuoso sistema de pleno vuelo. Por desgracia, el desarrollo técnico de la interceptación en fase de propulsión se halla aún en sus etapas preliminares. Las conversaciones que en 1999 mantuve con responsables de la defensa antimisil no prosiguieron y la MDA se demoró varios años antes de iniciar un programa oficial para la fase de propulsión.

En 2003, la Sociedad estadounidense de Física (APS) publicó un informe que analizaba el potencial de la interceptación en fase de propulsión. El documento fue redactado por una comisión de científicos e ingenieros altamente cualificados, muchos de ellos con años de experiencia en la defensa antimisil. Aunque la prensa lo presentó como un informe negativo, una lectura cui-

Interceptación en fase de propulsión

Para destruir un ICBM antes de que lance la ojiva y los señuelos —es decir, mientras el misil gana altura— el vehículo destructor debe interceptar el cohete en el transcurso de los cuatro primeros minutos tras el lanzamiento. La base de lanzamiento del interceptor debe hallarse a menos de 1000 kilómetros de la trayectoria inicial del ICBM. En el caso de Corea del Norte, los interceptores podrían emplazarse a bordo de buques en el mar de Japón. Para derribar ICBM iraníes, podrían lanzarse desde el mar Caspio o desde el golfo Pérsico.



ALFRED T. KAMAJIAN

dadosa muestra que las conclusiones concuerdan con las estimaciones cualitativas que yo mismo realicé en 1999. Según mis cálculos, se requerirían interceptores de 14 toneladas con una velocidad tras el apagado de ocho a once kilómetros por segundo. El sistema de guiado los dirigiría hacia la llamarada del ICBM y luego hacia el fuselaje; el interceptor se estrellaría contra el misil con fuerza suficiente para inutilizar los motores. El estudio del APS analizaba con gran detalle las posibles maniobras de evasión del ICBM y las prestaciones que requeriría el interceptor que pretendiera hacerle frente.

El informe de la APS mostraba las dificultades que entrañaría interceptar un ICBM procedente de Corea del Norte, de forma que se evitara el impacto de la ojiva —que podría permanecer útil tras la colisión— en EE.UU. u otro país. (Si el ICBM se alcanzara cerca del final de su fase de propulsión, la ojiva aún podría contar con suficiente ímpetu para llegar a Norteamérica.) En mi opinión, la interceptación debería seguir considerándose exitosa si la ojiva reentrara en la atmósfera sobre algún otro lugar de EE.UU. distinto del núcleo poblacional buscado. Puesto que la densidad media de la población estadounidense es sólo del orden del 1 por ciento de la densidad urbana máxima, dicha interceptación reduciría la fuerza misilística atacante a la centésima parte, suficiente para disuadir al enemigo.

Guerra en el espacio

Mientras la MDA se decide por cuál de las fases de propulsión decantarse, algunos miembros de la administración están desempolvando los viejos planes para interceptores espaciales que formaban parte de la antigua Iniciativa de Defensa Estratégica. El proyecto denominado Guijas Brillantes preveía una constelación de interceptores de baja órbita, dotado cada uno de suficiente combustible para propulsarse hacia un ICBM en ascenso y neutralizar cualquier maniobra evasiva que el misil pudiera intentar. El diputado de Pennsylvania Curt Weldon, firme partidario del sistema estadounidense de defensa antimisiles, advertía recientemente a los impulsores de los interceptores espaciales para que no se opusieran a los interceptores apostados en tierra y mar, pues una pugna interna no haría más que demorar ambos programas. Para muchos partidarios de la defensa antimisil de lo que se trata, a la postre, es de desplegar un sistema capaz de neutralizar los ICBM chinos y, en última instancia, rusos, algo que sólo podrían lograr los interceptores espaciales.

Un sistema apostado en el espacio, empero, resultaría extremadamente caro y vulnerable. Si los interceptores se situaran en una órbita terrestre baja, darían la vuelta al planeta cada 90 minutos, más o menos; ello obligaría a EE.UU. a desplegar más de un millar, para garantizar la presencia de un número suficiente de ellos en las proximidades de Corea del Norte, incluso aunque sólo se lanzara un misil. Si bien tales interceptores espaciales no necesitarían ser tan grandes como los lanzados desde tierra o mar, deberían equiparse con cohetes propulsores que les permitieran atrapar a tiempo los ICBM en ascenso. La APS es-

timó que los interceptores deberían pesar entre 600 y 1000 kg. Por tanto, si poner en órbita un solo kilogramo cuesta 20.000 dólares, el precio final del sistema de interceptación espacial se elevaría fácilmente a decenas de miles de millones de dólares.

Además, al sentirse amenazados por este sistema espacial, quizá los gobiernos chino y ruso decidieran tomar medidas preventivas. China puede parecer especialmente vulnerable porque cuenta sólo con unas dos docenas de ICBM equipados con dispositivos nucleares capaces de alcanzar Norteamérica. Si EE.UU. pusiera en órbita miles de interceptores en fase de propulsión, sin duda China construiría más misiles de largo alcance: el sistema espacial puede rebasarse lanzando un gran número de ICBM a la vez desde una zona reducida. Además, China tendría todos los alicientes para destruir los interceptores en órbita. A diferencia de un golpe preventivo sobre los sistemas con base en tierra o mar, el ataque contra un arma espacial no causaría bajas humanas y la comunidad internacional no podría considerarlo un acto de guerra.

Un satélite de órbita terrestre baja puede inutilizarse lanzando una nube de perdigones hasta la altura orbital para que el interceptor se destroce al atravesarla. Los chinos podrían emplear cohetes emplazados en tierra para derribar los interceptores uno a uno. Podrían también poner en órbita pequeñas minas espaciales, cada una a pocos centenares de metros de un interceptor, listas para detonar al primer aviso. Las mismas contramedidas podrían emplearse, incluso con mayor rentabilidad, para anular al láser espacial, otro sistema de defensa en fase de propulsión, de mayor tamaño y más vulnerable que los interceptores.

El punto más débil

Incluso los responsables de la MDA hablan poco en favor del actual sistema de defensa antimisiles. En su comparecencia de marzo del año pasado ante el Comité de Servicios Armados de la Cámara, el teniente general Ronald Kadish, durante largo tiempo director de la MDA y de su agencia antecesora, advirtió que las acciones emprendidas en 2004 y 2005 constituyen sólo el punto de partida, el inicio, e implicarán únicamente capacidades básicas. En mi opinión, sin embargo, el enfoque actual de la defensa antimisil resulta totalmente inútil frente a los ICBM de las nuevas o existentes potencias nucleares, dada la efectividad de las contramedidas en pleno vuelo.

Además, los ICBM no constituyen la primera amenaza misilística contra Estados Unidos. Si países como Corea del Norte o Irán decidieran atacar una ciudad estadounidense, resulta más probable que utilizasen misiles de corto alcance lanzados desde buques próximos a las costas de EE.UU. En una rueda de prensa de 2002, el Secretario de Defensa Donald H. Rumsfeld declaró: “La instalación de misiles balísticos a bordo de buques constituye una práctica harto extendida entre todos los países del mundo. Constantemente, varios de estos buques se pasean frente a nuestras costas. En cualquier momento pueden preparar el lanzador, disparar un misil, guardar la plataforma y esconderla. La señal que producen en un radar no muestra ninguna diferencia respecto de los otros 50 buques civiles que navegan por allí cerca”. Pese a tales consideraciones, el Departamento de Defensa carece de un sistema diseñado para hacer frente a esos misiles.

La inoperancia del actual sistema de defensa antimisiles resulta evidente incluso para los que habían apoyado el proyecto durante largo tiempo. El columnista conservador George Will escribía en fecha reciente: “Es más probable que un arma nuclear llegue a EE.UU. dentro de un contenedor marítimo, un camión, una maleta, una mochila o cualquier otro objeto común, que a bordo de un ICBM, que llevaría remitente”. Pero incluso en el caso, improbable, de un lanzamiento temerario por parte de un enemigo potencial irresponsable, el sistema de interceptación en pleno vuelo no ofrece la mejor defensa. Los esfuerzos de la MDA deben reorientarse hacia la interceptación en fase de propulsión; si el propósito es detener los ICBM norcoreanos e iraníes, entonces resultan más prometedores los interceptores apostados en tierra o mar. En todos esos casos, debe tenerse en cuenta la vulnerabilidad del sistema defensivo, lo que desde luego descarta las armas espaciales. En la defensa antimisil, lo mismo que en tantos otros campos, la robustez de un sistema viene limitada por su punto más débil.

El autor

Richard L. Garwin ha colaborado con el gobierno de EE.UU. desde 1950 en proyectos relacionados con armas nucleares, misiles, defensa antiaérea y defensa antimisiles. Físico experimental, posee una amplia formación en física nuclear y de partículas, física de la materia condensada y detección de ondas gravitatorias. Presidió de 1994 a 2001 el Comité Consultivo del Departamento de Estado para el Control y la No Proliferación de Armas.

Bibliografía complementaria

COOPERATIVE BALLISTIC MISSILE DEFENSE. Richard L. Garwin. Presentado en el Foro Abierto de la Secretaría de Estado, 18 de noviembre de 1968.

EL SISTEMA DE DEFENSA ANTIMISILES. George N. Lewis, Theodore A. Postol y John Pike en *Investigación y Ciencia*, octubre 1999.

COUNTERMEASURES: A TECHNICAL EVALUATION OF THE OPERATIONAL EFFECTIVENESS OF THE PLANNED U.S. NATIONAL MISSILE DEFENSE SYSTEM. A. M. Sessler y otros, Unión de Científicos Comprometidos y MIT, abril 2000.

REPORT OF THE APS STUDY GROUP ON BOOST-PHASE INTERCEPT SYSTEMS FOR NATIONAL MISSILE DEFENSE. D. Kleppner y otros en *Review of Modern Physics*, vol. 76, n.º 3, págs S1-S424; julio 2004.

TECHNICAL REALITIES: AN ANALYSIS OF THE 2004 DEPLOYMENT OF A U.S. NATIONAL MISSILE DEFENSE SYSTEM. L. Gronlund, D. C. Wright, G. N. Lewis y P. E. Coyle III. Unión de Científicos Comprometidos, mayo 2004.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

A través del espejo

Cuando Narciso vio su reflejo en la fuente, admiróse tan largo tiempo, que cayó al agua y se ahogó. La reflexión le había costado la vida... En la Antigüedad, hábiles artesanos pulían esmeradamente espejos de plata o bronce macizos. Esa técnica perduró hasta que en el siglo XIX se descubrió cómo depositar capas metálicas en el vidrio.

Los metales, todos ellos buenos conductores eléctricos, son también buenos reflectores. ¿Por qué? Porque contienen un gran número de "electrones libres". Los electrones libres de un trozo de metal inmerso en un campo eléctrico estático sufren una fuerza que los pone en movimiento. Si el metal forma parte de un circuito eléctrico, resulta una corriente. Si está aislado, los electrones libres quedan confinados en el interior de su volumen y los que llegan a la superficie se acumulan en ella; crean así un campo eléctrico hasta que compensa en el interior del material el campo eléctrico estático.

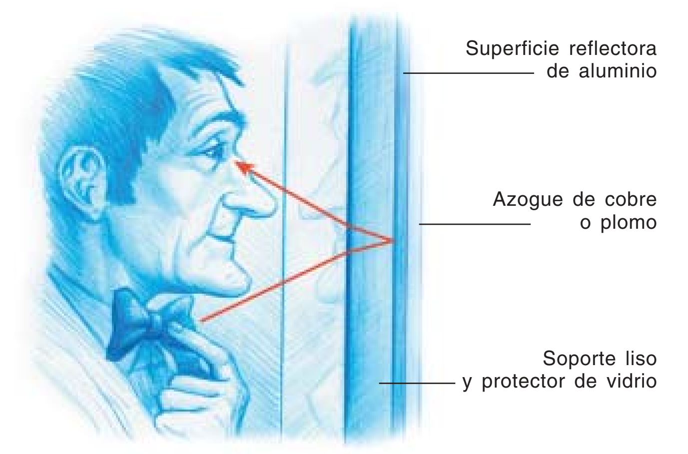
Un fenómeno análogo se produce cuando se ilumina un metal. La luz es una onda electromagnética constituida por un campo eléctrico y un campo magnético que se propagan y actúan de consuno. El campo eléctrico de la onda hace oscilar a los electrones libres que encuentra en la superficie. Ahora bien, toda carga eléctrica acelerada emite una onda electromagnética. Así, los electrones libres superficiales se comportan como minúsculas antenas que reciben y reemiten luz. En el interior del metal, la onda electromagnética reemitida se compensa con la onda incidente, de suerte que, como en el caso de un campo estático, el campo eléctrico resultante se anula: el metal no es transparente. Al emitir hacia el exterior, los electrones libres superficiales reflejan la onda incidente. Si la superficie del metal es plana, la señal emitida por el conjunto de los electrones oscilantes será una reproducción simétrica, respecto a la superficie, de la señal incidente, "su imagen" obtenida por la interferencia constructiva de la emisión de cada uno de los electrones.

Las vibraciones de los electrones

Los mejores conductores no son, sin embargo, los espejos más fieles. Más conductor que la plata, el oro refleja mal el azul, y de ahí su color amarillo. Este fenómeno es general: los conductores reflejan sólo las ondas de frecuencias inferiores a un límite específico, vinculado al modo en que los electrones pueden oscilar en el seno del metal. En el equilibrio, los electrones libres se reparten uniformemente por todo el volumen metálico de tal modo que sus cargas negativas compensan las cargas positivas de los iones del cristal. Así, las intensas fuerzas electrostáticas que unas ejercen sobre otras se compensan.

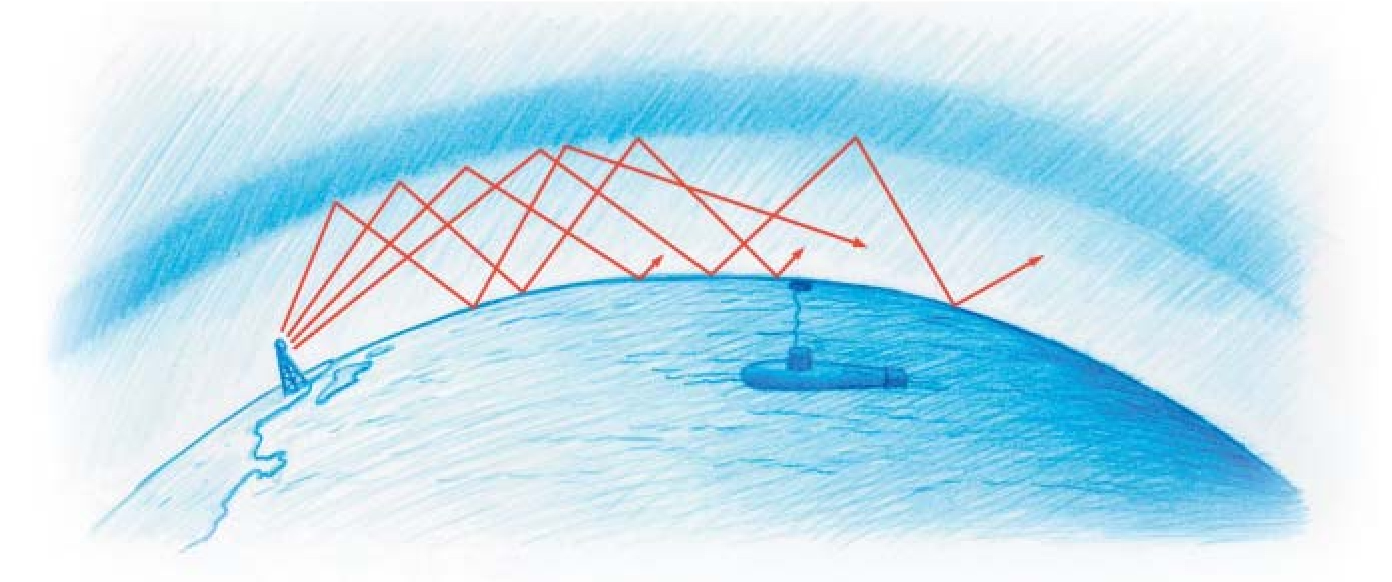
Si dentro del material se desplazan un poco algunos electrones libres, el desequilibrio local de carga inducirá unas fuerzas eléctricas que "repelerán" a los electrones hacia sus posiciones de equilibrio. Los electrones, de manera similar a la masa de un péndulo, oscilarán a una frecuencia característica del material, la frecuencia de corte llamada también "frecuencia de plasma". Mientras la frecuencia luminosa no sobrepase esa frecuencia, el campo eléctrico pondrá a oscilar a los electrones libres. Estos, en cambio, dejarán de reaccionar para frecuencias superiores a la de corte; entonces la onda seguirá propagándose a través del material, pues ya no se reflejará merced a





1. Una onda luminosa (*en rojo*) pone a vibrar los electrones libres de la superficie metálica (*flechitas naranja*). A baja frecuencia, la onda emitida (*en verde*) por la combinación de los electrones y la incidente en el material se compensan exactamente: en el metal no se propaga luz alguna. A frecuencia más alta, los electrones no pueden seguir las variaciones del campo electromagnético de la onda luminosa y una parte de alta frecuencia de la luz atraviesa el metal. Los espejos comerciales llevan una capa reflectora de aluminio intercalada entre una capa de vidrio transparente perfectamente lisa y una capa metálica opaca.

BRUNO VACARO



2. La Marina se comunica con los submarinos mediante ondas de baja frecuencia que se reflejan en la ionosfera, la tierra o el mar, que son medios conductores. Esos navíos reciben los mensajes elevando hasta la superficie una antena flotante.

las vibraciones de los electrones libres: el material será transparente para esas frecuencias altas.

En 1906, Lord Raleigh demostró que la frecuencia de corte es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de electrones libres. En la ionosfera, situada a una altitud de entre 60 y 300 kilómetros, las moléculas de aire están ionizadas y la densidad electrónica varía de 100 millones a 1 millón de electrones por centímetro cúbico; la frecuencia de corte va de 600 kilohertz a 60 megahertz. La luz visible, de frecuencias mucho mayores, atraviesa fácilmente la ionosfera. En cambio, las radioondas de frecuencia inferiores a 60 megahertz se reflejan en ella como en un espejo y de rebote en rebote circundan el planeta; de ahí que nos sea posible escuchar la radio de onda corta. La Marina aprovecha esta propiedad para comunicarse con los submarinos estratégicos, que deben recibir las órdenes nucleares gracias a antenas que funcionan a decenas de kilohertz.

La frecuencia de corte

Sólo los medios que ofrecen densidades electrónicas muy altas, como los metales, reflejan en el intervalo visible de frecuencias. La plata y muchos otros metales comunes, como el aluminio o el estaño, contienen del orden de 10^{23} electrones libres por centímetro cúbico, lo que sitúa su frecuencia de corte en el ultravioleta. Esos metales reflejan perfectamente toda la luz visible. Cuando se pulen, adquieren un aspecto característico: el “brillo metálico”.

Los metales con la misma densidad de electrones libres que la plata deberían también comportarse como buenos espejos para el visible. Sin embargo, algunos, como el oro o el cobre, contienen, además de electrones libres, un gran número de “electrones cuasilibres”. Estos electrones, débilmente ligados a los núcleos de la red metálica, interactúan también con la luz, lo cual rebaja la frecuencia de corte. Así, en el caso del oro o del cobre, se encuentra en el centro del espectro visible. Con sus frecuencias más altas, las longitudes de onda cortas (el azul, el violeta) se transmiten hacia el interior del metal, donde van siendo absorbidas. Iluminados con luz blanca, esos metales adquieren los colores vivos de las longitudes de onda largas (el amarillo, el naranja) que reflejan. No obstante, aunque amarillee la luz visible, el oro refleja el 99 por ciento de la radiación infrarroja. Se aprovechó esta propiedad en el diseño de los cascos de los astronautas de las misiones *Apolo*. La fina capa de oro que los revestía reenviaba la casi totalidad de la radiación infrarroja, y limitaba así el calentamiento del interior del casco. Esa capa era asimismo lo bastante tenue para que fuese transparente en el visible: los astronautas se presentaron en la Luna tras un espejo sin azogue.

¿Con qué espesor de plata o aluminio se hace un espejo? Si esos metales fueran conductores perfectos, ese espesor sería nulo. Sin embargo, son conductores reales y el movimiento de sus electrones libres está frenado por las fallas e impurezas de la red cristalina. Esas fricciones microscópicas, que causan la resistencia eléctrica, limitan también la amplitud de los movimientos de los electrones con que se topa la onda incidente, que luego penetra en el metal. Los electrones más profundos participan también en la reflexión.

A mayor resistencia eléctrica, menos eficaces son los electrones y más profundamente penetra la luz. La profundidad máxima de penetración de la onda es proporcional a la raíz cuadrada del producto de la resistividad del metal por la longitud de onda. Para las frecuencias de la luz visible (del orden de 5×10^{14} hertz) y para un conductor muy bueno como la plata o el cobre, ese espesor es del orden de tres nanómetros (varias decenas de distancias interatómicas). Así, basta una capa de plata de un vigésimo de micra para conseguir un buen espejo.

Con un conductor pobre como el agua de mar y para las grandes longitudes de onda, el espesor llega a la quincena de metros. Hecho éste feliz para los submarinistas, que pueden así captar los mensajes que se les envían sin acercarse demasiado a la superficie. Si, por precaución, desean permanecer a más profundidad, les basta con elevar una antena flotante.

BRUNO VACARO

Juan M.R. Parrondo

El número mayor y la información misteriosa

¿Se puede obtener información de la nada? Hay un sencillo problema de probabilidad en el que uno tiene la impresión de que algo semejante es posible. El problema es el *juego del número mayor* y consiste en lo siguiente. Alguien elige dos números al azar, pero distintos entre sí, escribe cada uno de ellos en un papel y nos da a elegir uno de los dos papeles. Nosotros tomamos uno de los papeles y leemos su contenido. Con esta información, tenemos que adivinar cuál de los dos números es el mayor.



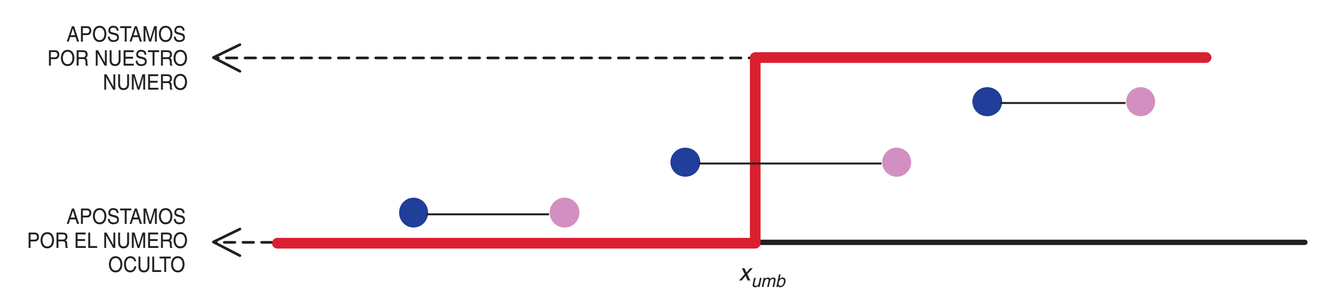
1. El juego: debemos adivinar cuál de dos números aleatorios es el mayor, conocido uno sólo de ellos.

Lo único que conocemos para adivinar cuál de los números es mayor es el número escrito en nuestro papel. No sabemos nada acerca de cómo se han elegido los números. Puede que sean positivos, negativos, entre 1 y 100 o entre 10.000 y 40.000. Parece entonces que leer el número de nuestro papel no nos puede aportar ninguna información. El otro número, el oculto, puede ser cualquiera y, por tanto, tenemos una probabilidad 1/2 de acertar, tanto si apostamos por nuestro número como si lo hacemos por el número oculto.

Sin embargo, se puede aumentar esta probabilidad con un truco sorprendentemente sencillo. Basta para ello que elijamos antes del juego un número umbral x_{umb}. Si el número que leemos en nuestro papel lo supera, diremos que dicho número es el mayor y si no lo supera, diremos que el número oculto es el mayor. ¿Es capaz esta estrategia de aumentar la probabilidad de ganar el juego? Llamemos a al mayor de los dos números y b al menor. En nuestro papel estará a con probabilidad 1/2 y b con probabilidad 1/2. Pueden darse tres casos: que tanto a como b estén por encima del umbral, que estén por debajo, o que a esté por encima y b por debajo (*véase la figura 2*). No sabemos con qué probabilidad se da cada uno de estos casos, pero lo que es seguro es que si se da el tercero de ellos, nuestro método del umbral acertará. En los otros dos casos el método del umbral tiene una probabilidad 1/2 de acertar. Por tanto, la probabilidad media de acertar es mayor que 1/2, siempre que el tercer caso ($a > x_{umb} > b$) se dé alguna vez, y es igual a 1/2 si no se da nunca. Es decir, hemos conseguido aumentar la probabilidad de ganar, siempre que coloquemos el umbral de modo tal que el caso $a > x_{umb} > b$ se dé en alguna ocasión.

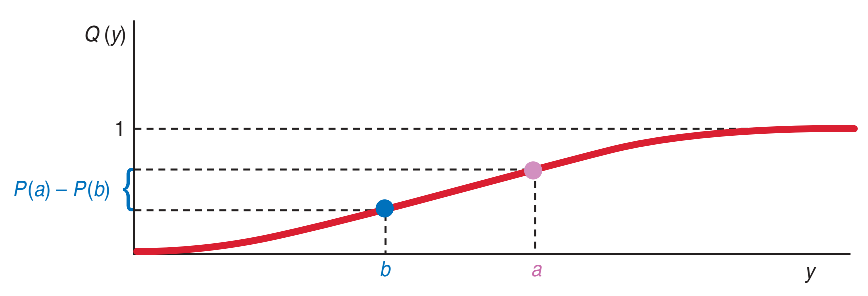
El lector puede pensar que aquí no hay nada misterioso. Podemos acertar con probabilidad mayor que 1/2, pero necesitamos algo de información para colocar el umbral adecuadamente. Si tomamos 100 como umbral y los números se eligen tirando un dado de seis caras o al azar entre 1000 y 2000, la estrategia no tiene ningún efecto. Para cuantificar mejor la influencia del umbral sobre la probabilidad de acertar, supongamos que cada uno de los dos números se elige al azar, de forma independiente, y tal que $P(x)$ es la probabilidad de que el número elegido sea menor que x. Entonces, la probabilidad del primer caso ($a, b > x_{umb}$) es $P_1 = [1 - P(x_{umb})]^2$; la probabilidad del segundo caso ($a, b < x_{umb}$) es $P_2 = P(x_{umb})^2$; y la del tercer caso ($a > x_{umb} > b$) es $P_3 = 2P(x_{umb})[1 - P(x_{umb})]$. La probabilidad de acertar es entonces:

$$P_{acertar} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) + P_3 = \frac{1}{2} + P(x_{umb})\,[1 - P(x_{umb})]$$



2. Los tres casos posibles en la estrategia del umbral: el mayor de los dos números, a, se representa con un punto morado y el menor, b, con uno azul. Cuando a está por encima del umbral y b por debajo (caso intermedio), se acierta siempre, mientras que, si ambos están por encima o por debajo (caso superior e inferior) se acierta con probabilidad 1/2.

La probabilidad de acertar más alta es $P_{acertar} = 3/4$ y se alcanza si ponemos el umbral de forma que $P(x_{umb}) = 1/2$. Por ejemplo, si los números se escogen al azar entre 1 y 100, $P(x) = x/100$ y el umbral óptimo será 50. En general, si los números se escogen al azar en un cierto rango, el umbral óptimo será el punto medio de dicho rango. Por el contrario, si $P(x_{umb}) = 0$ o 1, los dos números elegidos siempre estarán por encima o por debajo del umbral, respectivamente, y, por tanto, el método del umbral no ofrece ninguna ventaja ($P_{acertar} = 1/2$). Necesitamos por tanto conocer cómo se eligen los números para encontrar un umbral adecuado.



3. Estrategia aleatoria: si *y* es el número que encontramos en nuestro papel, apostamos por él con una probabilidad *Q*(y) (*curva roja*).

Sin embargo, una modificación del truco del umbral permite acertar con probabilidad mayor que 1/2 sin conocer nada acerca de cómo se han elegido los números inicialmente. En lugar de un umbral que nos dice por qué número apostar, elijamos una probabilidad $Q(y)$ entre 0 y 1 de apostar al número y que hay en nuestro papel. La estrategia es en sí misma aleatoria, es decir, no nos dice por qué número apostar sino que nos da la probabilidad de hacerlo por uno u otro: si el número que leemos en nuestro papel es y, diremos que es el mayor con una probabilidad $Q(y)$. Lo asombroso es que esta probabilidad puede ser cualquiera, con tal de que aumente cuando lo haga y, como la curva roja de la figura 3. Esto es razonable: cuanto mayor sea y con más probabilidad diremos que es el número mayor.

Como antes, llamemos a al número mayor y b al menor. El número y en nuestro papel será a con probabilidad 1/2 y b con probabilidad 1/2. Acertamos si $y = a$ y decimos que es el mayor, algo que ocurre con probabilidad $Q(a)/2$; o bien, si $y = b$ y decimos que el número oculto es el mayor, algo que ocurre con probabilidad $[1 – Q(b)]/2$. Por tanto, la probabilidad de acertar es:

$$P_{acertar} = \frac{Q(a)}{2} + \frac{1 - Q(b)}{2} = \frac{1}{2} + \frac{Q(a) - Q(b)}{2}$$

que es mayor que 1/2, puesto que $a > b$ y, por tanto, $Q(a) > Q(b)$, como se muestra en la figura 3. ¡Obsérvese que el resultado es válido para cualquier par de números elegidos y para cualquier probabilidad $Q(y)$! Lo único necesario para demostrar que la probabilidad de acertar es mayor que 1/2 es que $Q(y)$ crezca cuando crece y. Aunque parezca increíble, el argumento es correcto. Es cierto que, para encontrar la verdadera probabilidad de acertar, habría que promediar sobre los posibles valores de a y b (con a mayor que b), pero dicho promedio será siempre mayor que 1/2, por ser $Q(a) – Q(b)$ una cantidad positiva para cualquier par de valores a, b con a mayor que b. Para la elección concreta "$Q(y)$ es igual a 1 cuando y supera x_{umb} y 0 si no lo supera" recuperamos el método inicial del umbral, y vemos que $P_{acertar}$ es 1/2 si a y b están ambos o bien por encima o por debajo del umbral, pero es 1 si a está por encima y b por debajo.

Es cierto que la ventaja sobre la elección aleatoria ($P_{acertar}$ es 1/2) puede ser mínima. Téngase en cuenta que $Q(y)$ tiene que crecer de 0 a 1 cuando y crece de menos infinito a infinito. Por tanto, en algunos tramos $Q(y)$ tiene que crecer muy despacio, como ocurre para valores pequeños o grandes de y en la curva roja de la figura 3. Si el rango de valores que pueden tomar los dos números elegidos está en una zona en donde $Q(y)$ crece muy despacio, entonces la ventaja de nuestro método será muy pequeña. Aun así, lo sorprendente es que si $Q(y)$ crece siempre, dicha ventaja será mayor que cero, admitido que los números iniciales se han obtenido al azar y de forma independiente, pero sin importar su distribución de probabilidad.

¿De dónde hemos sacado la información que nos permite predecir cuál de los dos números es el mayor con una probabilidad superior a 1/2? En mi opinión, es un auténtico misterio. Creo que la pregunta "¿cuál es el número mayor?" es extremadamente sensible a cualquier pequeña información acerca de cómo se obtienen los números. Si conocemos la distribución de probabilidad con la que se han obtenido, podemos acertar con una probabilidad 3/4, utilizando el método del umbral óptimo. Bastaría incluso conocer el rango en el cual pueden estar los números para escoger un umbral adecuado (aunque no el óptimo). La estrategia de $Q(y)$ parece utilizar simplemente el hecho de que los números elegidos están en un cierto rango, o, lo que es lo mismo, ¡utiliza el simple hecho de que los números existen!

Por último, conviene recordar que las probabilidades no tienen mucho sentido cuando se aplican a un solo turno del juego. Habría que aplicar la estrategia de $Q(y)$ a un gran número de turnos para observar la ventaja de la que hemos estado hablando. Pero, en el caso de jugar varios turnos, y siempre que se nos permita cambiar de estrategia en cada uno de ellos, podríamos utilizar la información de turnos anteriores para modificar $Q(y)$. Mi impresión es que la mejor estrategia sería utilizar como umbral la mediana de los números que han salido hasta el momento, es decir, un umbral que esté por debajo de la mitad de dichos números y por encima de la otra mitad. De todos modos, quizá los lectores encuentren una estrategia mejor o puedan arrojar algo de luz sobre el enigmático origen de la ventaja proporcionada por la estrategia de la figura 3. <parr@seneca.fis.ucm.es>

Mark Fischetti

MARCAPASOS

Mantener el ritmo

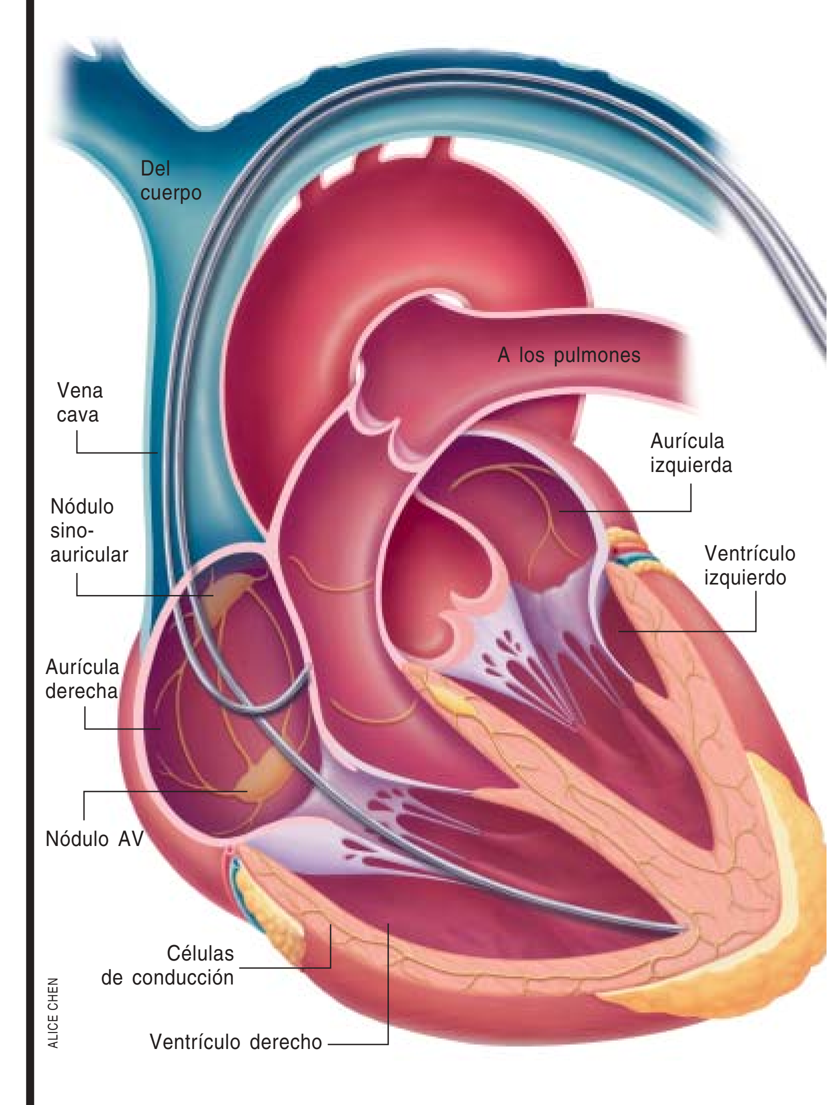
Cerca de cuatro millones de personas en el mundo llevan marcapasos. Estos dispositivos empezaron a utilizarse de forma experimental hace 50 años para estimular los corazones que latían demasiado lento.

En un corazón sano, células musculares de conducción de electricidad provocan la contracción de la aurícula y los ventrículos. Si el latido se altera, un marcapasos envía un impulso eléctrico a puntos elegidos del corazón para recuperar o coordinar la contractilidad. Los primeros marcapasos operaban a un único ritmo. Los modernos, en cambio, ofrecen mayor versatilidad y sensibilidad: ajustan el ritmo cardíaco guiados por el seguimiento de la actividad eléctrica y el movimiento corporal. En la actualidad, existen también marcapasos especiales que estimulan directamente cada ventrículo, resincronizando los que se contraen a destiempo —alteración que suele producirse en los corazones debilitados por un infarto.

El tamaño de los marcapasos ha disminuido hasta el de una caja de cerillas. Ello se ha logrado merced a los avances en electrónica e informática, pero también a la incorporación de una cápsula de esteroides, que se sitúa en el extremo del cable que conduce las descargas eléctricas al corazón; reduciendo la inflamación tras el implante, ese fármaco mantiene el electrodo en contacto con el músculo cardíaco viable, rebajando así el voltaje que debe generar el marcapasos y facilitando la miniaturización de los componentes. Según Toby Markowitz, supervisor de la investigación sobre marcapasos que Medtronic lleva a cabo en Minneapolis, la acción de los esteroides ha resultado crucial. Cuando se agotan las baterías, al cabo de entre seis y diez años, el aparato se cambia entero (excepto los cables) por dos motivos: por un lado, la batería está unida a la funda; por otro, los marcapasos suelen evolucionar de forma notable durante ese lapso.

Desde la década de 1980, un producto derivado del desarrollo técnico ha ganado protagonismo: el desfibrilador cardioversor implantable (DCI). Del tamaño de un busca, estimula las aurículas o los ventrículos que tiemblan o se contraen incontroladamente (fibrilan) para que el corazón del paciente se reajuste por sí mismo a la normalidad; se evita así la parada cardíaca repentina que acaba con la vida de millones de personas cada año. En 2003 se implantaron, sólo en Estados Unidos, unos 80.000 DCI. Estos dispositivos incorporan también la función de marcapasos; en opinión de Markowitz, algún día podrían incluso sustituirlos, si se redujeran su tamaño y coste —y las compañías de seguros médicos aprobaran el cambio.

1. LA CONDUCCION ELECTRICA activa cada latido del corazón. Las células musculares del nódulo sinoauricular se despolarizan conforme la aurícula se llena de sangre, produciendo una despolarización en cadena —una onda de impulso eléctrico— hacia el nódulo auriculoventricular (AV). Este retarda el impulso hasta que la aurícula llena los ventrículos. Entonces, envía el impulso en torno a los ventrículos, haciendo que éstos se contraigan simultáneamente. El nódulo sinoauricular ajusta el ritmo cardíaco en respuesta a cambios en la concentración de oxígeno en la sangre que retorna del cuerpo; el oxígeno decrece durante el esfuerzo físico.



¿SABIA USTED QUE...?

➤ **EQUIPO DE RESERVA:** Todas las células cardíacas llevan su propio ritmo. El de las células del nódulo sinoventricular, sin embargo, es el más rápido; por tanto, éstas desencadenan los impulsos contractivos que recorren todo el corazón, estableciendo un pulso de 60 a 100 pulsaciones por minuto (ppm). Si el nódulo se daña, las células auriculares se hacen cargo de la función directora, pero sólo logran establecer un ritmo de 40 a 80 ppm. Si éstas fallan, las células del nódulo auriculoventricular (AV) reúnen fuerzas para alcanzar entre 30 y 40 ppm —suficiente para mantener viva a una persona.

➤ **LLAME USTED MISMO:** Cada paciente puede examinar su propio marcapasos. Para ello se pone una muñequera en cada brazo y aprieta una varilla magnética contra su pecho, sobre el marcapasos. A continuación, pone el auricular de su teléfono en un soporte transmisor conectado a las muñequeras y a la varilla y llama a su médico, que comprueba el funcionamiento del marcapasos y el estado de la batería. Los últimos modelos envían los datos directamente al ordenador del médico.

➤ **ZONAS PROHIBIDAS:** Según Medtronic, los implantados con marcapasos no deben preocuparse por las interferencias electromagnéticas de hornos de microondas, mantas eléctricas o detectores de metales. Tampoco constituyen ningún peligro los arcos antirrobo que encuentren a la salida de algunas tiendas, siempre que se mantengan a una distancia prudencial. Pueden surgir problemas al acercarse demasiado a grandes altavoces estéreo, motores de gasolina u otros dispositivos o instalaciones que generen campos magnéticos intensos. El teléfono móvil no debe guardarse en ningún bolsillo cercano al corazón. Los aparatos de resonancia magnética están absolutamente prohibidos. Para terminar con cualquier complicación basta con alejarse del foco. Los marcapasos se averían en raras ocasiones.

2. EL CIRCUITO DEL MARCAPASOS emite un impulso de 1 a 5 volt si el procesador de señal detecta que el pulso del corazón es demasiado lento, descompensado o se para. Un acelerómetro indica al dispositivo que avive el latido si detecta actividad física. Un técnico recupera información de la memoria mediante una varilla magnética que, a través de la piel, envía señales de radiofrecuencia a una antena. Los desfibriladores cardioversores implantables corrigen los temblores (fibrilación) de las aurículas o de los ventrículos, que pueden causar una parada cardíaca, mediante una descarga de 30 joules o más, restaurando el sistema conductivo del corazón. El dispositivo puede también detener un latido acelerado (taquicardia) y ejercer las funciones de marcapasos.

Acelerómetro
Procesador de señal
Memoria
Batería
Antena

Transformador
Microprocesador
Batería
Condensadores

3. LOS MARCAPASOS COMUNES cuentan con dos cables para acelerar un latido lento. Los modelos especiales, con un tercer cable (*no aparece en la ilustración*) al ventrículo izquierdo, sincronizan las contracciones descoordinadas de los ventrículos —una alteración habitual en personas con el corazón delicado o dañado por un infarto.

4. EL EXTREMO de un cable conductor se fija en el tejido cardíaco; emite un pequeño impulso eléctrico que activa las células de conducción. El cable detecta también el latido del corazón —que el marcapasos registra—. Durante varios meses tras la implantación, una cápsula de esteroides libera poco a poco su contenido, minimizando la inflamación y el riesgo de rechazo.

Reserva de esteroides
Cable



5. EL DESFIBRILADOR cardioversor (DCI) se implanta en el tórax; los cables se hacen llegar al corazón a través de las venas.

LIBROS

Estudios zoológicos

Instantáneas

THE KINGS AND THEIR HAWKS. FALCONRY IN MEDIEVAL ENGLAND, por Robin S. Oggins. Yale University Press; New Haven, 2004.

LA MIGRATION DES ANIMAUX: CONNAISANCES ZOOLOGIQUES ET EXPLOITATIONS ANTHROPOLOGIQUES SELON LES ESPÈCES, LES LIEUX ET LES ÉPOQUES. COLLOQUES D'HISTOIRE DES CONNAISSANCES ZOOLOGIQUES, 15. Dirigido por Liliane Bodson. Université de Liège; Liège, 2004.

ANTONIO VALLISNERI. QUADERNI DI OSSERVAZIONI. VOLUME I. A cura di Concetta Pennuto. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 2004. CORRUZIONE E GENERAZIONE. JOHN T. NEEDHAM E L'ORIGINE DEL VIVENTE, por Marta Stefani. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 2002.

VON DER "ENTWICKELUNGSMECHANIK" ZUR ENTWICKLUNGSBIOLOGIE. BEITRÄGE ZUR 11.JAHRESTAGUNG DER DGGTB IN NEUBURG A.D. DONAU 2002. Dirigido por Ekkehard Höxtermann, Joachim Kaasch y Michael Kaasch. VWB-Verlag für Wissenschaft und Bildung; Berlín, 2004.

Nadie se imagina hoy un laboratorio de investigación básica o aplicada sin su animalario asociado. A muy pocos les ha llegado que los primeros experimentos con ratas se remontan a 1664, cuando Robert Hooke observaba su reacción en los ensayos con "aires". Lo cierto es que la historia de nuestros conocimientos biológicos viene, en muchos puntos, pautada por el avance de la zoología. Se nos abrió ésta, constituida ya en ciencia, con los cinco tratados aristotélicos: *Sobre la historia de los animales, Sobre las partes de los animales, Sobre la generación de los animales, Sobre el paso de los animales* y *Sobre el movimiento de los animales*. De época romana procede ya una síntesis práctica, el *Physiologus*, fuente de los aviarios, un género que gozó de secular aprecio hasta muy adentrada la baja Edad Media.

Con los mimbres aristotélicos se entrelazaron en buena medida los capítulos zoológicos de las enciclopedias medievales, que tomaron por prototipo el *al-Sifa* de Avicena y se propusieron compilar, sobre todo, los expuestos en el *Liber animalium* del estagirita, que agrupaba los tres primeros tratados mencionados. Pero no todo lo medieval es copia. Basta fijarse en dos vertientes que apresuradamente podrían reputarse marginales, a saber, la cetrería y la migración estacional (*The Kings and Their Hawks. Falconry in Medieval England*, *La migration des animaux: connaisances zoologiques et exploitations anthropologiques selon les espèces, les lieux et les époques*).

Robin S. Oggins ha dedicado cuarenta años a componer la primera historia de la cetrería británica desde Guillermo I hasta la muerte de Eduardo I en 1307. No obstante, el alcance de su obra traspasa los contornos de las islas y bebe en fuentes continentales de todo tipo, documentales, literarias, artísticas y arqueológicas. El primer manuscrito identificado hasta la fecha, el *Anónimo de Vercelli*, data de mediados del siglo X. Un segundo texto, del siglo XI, el *Liber accipitrum* de Grimaldo, pudiera depender de un original carolingio precedente.

Igual que en otras materias, los manuscritos de cetrería empiezan a abundar desde el siglo XII. Se reconocen hasta ocho textos relativos al tema. Dos aparecen firmados por halconeros, Guillelmus Falconarius y Gerardus Falconarius. Tres se atribuyen a médicos, Grisofus Medicus y Alexander Medicus e Hipócrates. Una a Dancus, legendario rey de Armenia. Otro, en forma de carta apócrifa escrita por Aquila, Symmachus y Theodotion al rey Ptolomeo de Egipto, que contenía una sección sobre diversos tipos ("genera") de rapaces y halcones. Y, por fin, un texto de la figura máxima del saber de ese tiempo, Adelardo de Bath. En general, combinan el arte de la caza con información veterinaria acorde con la teoría galénica de los humores. El manuscrito asignado a Dancus, por ejemplo, especifica qué remedios convienen a los halcones negros, que son melancólicos, qué otros a los halcones blancos, de constitución flemática y seca, y cuáles a los halcones rojos, sanguíneos de temperamento. Al abordar las enfermedades de las rapaces y su tratamiento Adelardo sigue el patrón, escueto y didáctico de su obra naturalista, ya comentada en estas páginas.

En el siglo XIII encontramos el primer texto vernacular sobre cetrería: el poema provenzal *Dels auzels cassadors*, escrito por Daude de Pradas. Por su parte, los enciclopedistas de esa época —Alexander Neckam, Bartholomaeus Anglicus, Thomas de Cantimpré, Vincent de Beauvais, Alberto Magno y Brunetto Latini— incluían extensas digresiones sobre los halcones en el apartado dedicado a las aves. Así, el *De naturis rerum* y, sobre todo, *De utensilibus*, de Neckam, quien tras formarse en París volvió a su Inglaterra natal y llegó a abad de Cirencester; o el *De proprietatibus rerum*, de Bartholomaeus Anglicus (fl.1230-50), fraile franciscano, nacido en Inglaterra, que vivió en Oxford, París y Magdeburgo. De categoría muy superior, fue la enciclopedia de Thomas de Cantimpré. Mas a los habituales préstamos de autores precedentes que caracterizan a los enciclopedistas mencio-

nados, hemos de agregar las valiosas observaciones y descripciones personales de san Alberto en su *De animalibus* y de Federico II Hohenstaufen (1194-1250), emperador de Alemania y rey del reino normando de Sicilia, en su monumental *De arte venandi cum avibus*.

Del fenómeno de la migración, tan unido a la sucesión estacional y al imaginario de una población agrícola, habló ya Aristóteles, quien la distinguía de la hibernación y de la metamorfosis, amén de reparar en la oleada migratoria de peces en el Ponto Euxino. Con el tiempo el hombre ha ido conociendo un número creciente de especies que, instadas por variaciones de temperatura, disponibilidad de nutrientes o ciclo reproductor, cambian de ubicación de una forma estacional o permanente. A las golondrinas y cigüeñas, la gente común ha ido sumando reptiles (tortugas), insectos (*Danaus plexippus*), peces (*Salmo salar*) o mamíferos (*Rangifer tarandus*).



Halcón sobre pato. *Psalterio de Alfonso*, c. 1284.

Los enciclopedistas siguen a Aristóteles en sus incursiones sobre la migración. No sólo. Otros inspiradores son Plinio el Viejo, el *Physiologus* y Solin, aunque Isidoro sintetizara esa tradición de suerte tal, que la hiciera incomprensible. El carácter cíclico, el orden y la orientación de estos desplazamientos permiten a menudo una interpretación moral y espiritual. En la *Vida de san Columba*, del siglo octavo, leemos que la llegada de la grulla a la isla de Iona constituía

Superconductividad

The Cold Wars: A History of Superconductivity, por Jean Matricon y Georges Waysand. Rutgers University Press; New Brunswick, 2003.

El fenómeno de la superconductividad resulta especialmente interesante desde varios puntos de vista. Es atrayente en sí mismo, porque ayuda a comprender mejor la constitución íntima de la materia. Dentro de la física de la materia condensada, guarda estrecha relación con algunos apartados fundamentales de la especialidad, como las transiciones de fase o la teoría de los metales. Hay explicaciones, métodos y teorías nacidas al estudiar la superconductividad —las ecuaciones de Ginzburg-Landau, por ejemplo— que se han extendido a otros ámbitos. Además, a este tema le consagraron sus afanes algunos de los mejores físicos del siglo XX, lo que garantiza una calidad excepcional de los trabajos científicos. Las técnicas criogénicas, de gran relevancia, guardan estrecha relación con la superconductividad. Sin olvidar la candente cuestión de las posibles aplicaciones que —se predice— revolucionarán la sociedad y han despertado una enorme curiosidad por parte del público en general.

Esta recapitulación, bien dispuesta, es sugerente y amena. Los autores abordan el tema desde una perspectiva histórica y sociológica, por decir así. No es una obra de divulgación en la que se presente el tema con un esquema racional, de lo simple a lo complejo, de lo concreto a lo abstracto. Entran los sucesos, los experimentos, las teorías, por orden cronológico; se incluyen interpretaciones que más tarde se revelaron incorrectas, las dudas de los propios investigadores y sus yerros más aparatosos. Se analiza muchas veces el avance del saber a la luz de algunas teorías de la ciencia, de modo que a veces la interpretación de los hechos ocupa un lugar preponderante.

Al adoptar este enfoque se dejan de lado otros aspectos igualmente interesantes; así, no es la mejor obra a la que acudir para buscar conocimientos básicos sobre la superconductividad, ni siquiera en un nivel divulgativo. Quizás uno de los defectos que se le pueden afear sea precisamente el escaso contenido estrictamente científico. Bien es verdad que no hay errores ni malentendidos —los autores son especialistas en superconductividad—, pero con eso no es suficiente. Los recuadros con aclaraciones marginales o las abundantes notas, que se hubieran podido aprovechar para ofrecer una explicación científica divulgativa, resultan decepcionantes e incoherentes (si los autores se creen obligados a definir el gradiente en una nota, ¿cómo es que luego no brindan la más mínima aclaración sobre lo que son los fonones blandos, por poner un caso?). Con tales exposiciones, el profano seguirá encontrando dificultades para comprender los conceptos, mientras que al especialista le parecerán ingenuas.

Lego y experto, sin embargo, pueden pasar por alto este punto y recrearse en la narración. Se describen ambientes, personajes y situaciones; la política de la investigación científica a lo largo de los años y en los diferentes países; la génesis de los avances más relevantes en la superconductividad; el marco en el que se produjeron esos avances, que muchas veces sólo se dan si las condiciones son propicias; las relaciones de los investigadores entre sí y con la sociedad en general; y otros asuntos que tocan a la ciencia en cuanto actividad humana. Es un acierto centrarse en una especialidad, y tratar todos estos temas en el caso concreto que se considera. Así el relato resulta mucho más vivo. Como además la obra está escrita con pulcritud y corrección, la lectura es comprensible y entretenida.

—Angel Garcimartín



Halcón presto para remontar el vuelo. Tapiz del año 1500, aproximadamente.

una ocasión para que el santo practicara la caridad y ejercer la hospitalidad con los viajeros, fueran personas o aves migradoras. No faltan, sin embargo, atinadas observaciones naturalistas. Brunetto Latini advierte su llegada en primavera y su partida otoñal; su vuelo en formación, tras el guía o piloto de la bandada. Thomas de Cantimpré señala que migran cigüeñas, grullas y golondrinas. Propio de las migradoras, recuerda san Alberto, es volar alto.

Sabido es que la capacidad migratoria estacional de los Lepidópteros no se conoció hasta comienzos del siglo XX. Pero en la belleza exótica de las especies inmigrantes habían reparado ya los pintores flamencos de los siglos XVI y XVII. Lo ha estudiado Vincent Fagniart a través de las representaciones de *Vanessa atalanta, Pieris brassicae, Abraxas grossulariata* y otras mariposas en los cuadros de Daniel Seghes, Jan van Kessel o Joris y Jacob Hoefnagel. En comparación con especies sedentarias, es sobre todo en la pintura de flores típica de la época donde se descubren la mayoría de estos lepidópteros. Desde el siglo XV los artistas se han esforzado por representar las mariposas con un afán de realismo creciente. *Vanessa atalanta* confirmada hoy como el migrador más frecuente en Bélgica, es la especie preponderante en los cuadros.

Cierto es que la entomología científica no había permanecido estancada en su búsqueda de un dominio más hondo de la anatomía, fisiología y sistemática. Antes de la obra culminante de los grandes naturalistas del siglo XVIII, no fue insólito acompañar a una descripción precisa del insecto cazado el dibujo cuidadoso de su morfología externa. En *De animalibus insectis,* de Ulisse Aldrovandi, publicada en 1602, se trazan los rasgos identificadores de *Papilio machaon, Saturnia pyri* y *Achaerontia atropos*. Unos decenios antes, Konrad Gessner había acometido la redacción de una monumental *Historia animalium*; su muerte precoz le impidió dar fin al volumen consagrado a los insectos; los materiales llegaron a manos de Thomas Penny, quien tampoco pudo terminar su deseada enciclopedia entomológica. Prosiguió Thomas Moufet con el proyecto, tomando datos de la obra de Wotton y sumando observaciones personales. También él murió antes de ver publicada su obra. Esta fue finalmente editada en 1634, en Londres, con el título *Insectorum sive Minimorum Animalium Theatrum olim ab Edoardo Wotton, Conrado Gesnero, Thomaque Pennio*. Copiosamente ilustrado, ofrece excelentes grabados de mariposas sobre madera.

A medio camino entre el entomólogo profesional y el artista, Johannes Godaert ofrecía en *Metamorphosis naturalis*, publicado en 1665, la descripción y el dibujo de unas 140 especies de insectos, cuyos modelos procedían, en su mayoría, de su propia caza y cuidado. Expone el desarrollo del insecto en cada uno de sus estadios (huevo, oruga, crisálida). A propósito de las ilustraciones de mariposas adultas, las capta en diferentes posturas. En el dominio meramente pictórico, Daniel Seghers, vástago de un extenso linaje de artistas, rodeaba sus cuadros con un festón floral; en su obra “Guirlanda de flores con la educación de la Virgen” aparecen cinco mariposas; una de ellas, con las alas plegadas, es el inevitable lepidóptero migrador ya mencionado: *Vanessa atalanta*, posada sobre una flor. En “Mariposas e insectos sobre una ramita”, de Jan van Kessel, aparecen cuatro lepidópteros: *Papilio machaon, Abraxas grossularia*, *Vanessa atalanta* y *Lomaspilis marginata*, de la familia de los geométridos. De la precisión del dibujo se deduce una observación directa.

El estudio de los insectos, asociado en el siglo XVIII al origen de

la vida, toma un nuevo giro con la escuela de Malpighi (*Antonio Vallisneri. Quaderni di Osservazioni*). Recibida una rigurosa formación humanística con los jesuitas de Módena, Vallisneri comienza sus estudios universitarios en 1682. Alumno de Malpighi, quien lo acoge bajo su directa protección y lo introduce en el ambiente cultural de Bolonia. De entre las principales corrientes filosóficas de su tiempo —democrítea, cartesiana y atomista—, Vallisneri se siente atraído por la última, sobre la que escribe *Titi Lucretii Cari philosoph, ac poetae vestustissimi pulchriora ex sex libris de rerum natura enucleata hic alphabetico ordine rescripta sunt*, fechado en 1687, es decir, concluido el período universitario y antes del comienzo del trabajo experimental con las agallas, que le permitirán rebatir la teoría de la generación espontánea de los insectos encerrados en las mismas. A sus *Quaderni di osservazioni* y de los *Giornali sopra gl'insetti* se dedicó entre 1694 y 1701, aunque las primeras anotaciones, realizadas en Scandiano y alrededores, se remontan a 1690 y una de las últimas ocurre en Padua, en las postrimerías del verano de 1713.

Los *Quaderni* amasan observaciones personales con extractos sacados de libros y artículos ajenos. Se apoya en Redi, primero. Contrasta su trabajo de campo con lo declarado por Aldrovandi en el *De animalibus insectis* por Moffet en el *Insectorum sive minimorum animalium theatrum*, por J. Johnston en el *Historiae naturalis de insectis liber*, por Sennert en la *Hypomnemata physica*, y por Goedaert en el *De insectis*. Dialoga también con Lister y Swammerdam. De especial interés para entender el progreso de los *Quaderni* son las referencias a los ensayos y trabajos aparecidos en publicaciones periódicas contemporáneas, así las "Academiae Cesareo-Leopoldinae Carolinae Naturae Curiosorum Ephemerides", que coteja con sus propias aproximaciones al abigarrado mundo de las avispas, orugas, larvas, huevos, crisálidas, mariposas diurnas y nocturnas, de todos los tamaños y colores, en verano y primavera, grillos, cigarras, agallas de todo tipo, escarabajos y hormigas, parásitos del hombre y parásitos de insectos. Le guía un objetivo de fondo: exponer las características y el comportamiento de los insectos según el método experimental representado por Galileo, Redi y Malpighi. Acabando con la generación espontánea, pensaba, se daría el golpe de gracia a la filosofía natural aristotélica. Contra la ciencia *ex dicto* reclama repetir una y otra vez el experimento ratificador.



Mosquito del Sangallo (*Quaderni di Osservazioni*, de Vallisneri).

Signo del nuevo modo de hacer ciencia es el uso frecuente del microscopio. En los *Quaderni* su empleo sistemático se considera indispensable para mejor comprender las estructuras finas y distintivas entre insectos. Recurre también al saber práctico de pescadores, campesinos y artesanos. Cualquiera puede aportar observaciones directas valiosas, en particular del comportamiento. Abundan aquí las notas sobre distintos aspectos etológicos: vuelo nupcial y acoplamiento, nidos y peculiaridades de su construcción, alimentación de las larvas y mantenimiento de las presas. Se enmarca todo ello en un entramado doctrinal cuya idea nucleadora es la tesis de la gran cadena de los seres, animados por supuesto. Discrepa, pues, de Descartes. Para Vallisneri, existe el alma animal; más aún rechaza aplicar el mecanicismo siquiera a los insectos más elementales, en los cuales advierte un "no sé qué industrioso, mucho más que una máquina".

De la aplicación tenaz del microscopio se sirvió también John Toberville Needham para reforzar sus ideas sobre otro capítulo incipiente de la zoología del siglo XVIII, la embriogénesis y regeneración (*Corruzione e Generazione*). Cuando entra en escena, predomina en la ciencia una poderosa corriente, representada por Christian Wolff, que explica el orden, la existencia y el desarrollo de los cuerpos vivos a través de leyes mecánicas. Relojes y edificios servirán de modelos causales de los organismos vivos.

Needham nació en Londres en 1713 en el seno de una familia católica. Estudió en el continente y se hizo sacerdote. Pese a ello fue nombrado, en 1741, miembro de la Regia Sociedad de Londres, en cuyo seno fomentó los trabajos biológicos y microscópicos. En ese mismo decenio aborda sus primeros ensayos de regeneración de estrellas de mar. Magnífica su minuciosa descripción anatómica y morfológica del calamar, en *An account of some discoveries founded on an examination of the Calamary and its wonderful miltvessels* (1745). Con la misma fuerza que Vallisneri pugnó contra la generación espontánea se manifestó Needham contra el preformacionismo. Los *animálculos* que bullían ante la lente del microscopio (espermatozoides, granos de polen, mohos, gusanos de la harina) no están compuestos por gérmenes caídos del cielo, sino por "átomos vivos" o *semences universelles*, que se destruyen por putrefacción.

Los *animálculos* tardaron todavía años en perder su carácter misterioso. Karl von Baer empezó por imponerles un nuevo nombre, orientador: espermatozoides, y R. von Koelliker pergeñó su función. La fecundación como unión de pronúcleos no la demostró Oscar Hertwig hasta 1875. Las investigaciones microscópicas de fluido espermático de casi todos los grupos de metazoos condujeron a G. Retzius, en los albores del siglo XX, a la creación de una nueva disciplina, la espermatología. Pero,

Humanistas matemáticos

MATHEMATICS AND CULTURE. Dirigido por Michele Emmer. Springer Verlag; Berlín, Nueva York, 2004.

El libro recoge las actas de un congreso (Venecia 1999), que reunió a matemáticos con intereses humanísticos (hay muchos más de lo que comúnmente se cree) y humanistas con intereses matemáticos (son desgraciadamente muy pocos). El resultado de su trabajo en común es valioso y, aún más, importa no sólo a los matemáticos profesionales, sino también a un sector muy amplio de la llamada *gente de la cultura.*

Como es habitual en este tipo de congresos, los matemáticos realizan, en general, un enorme esfuerzo para hacer comprensibles los conceptos que utilizan (hemos de reconocer que con éxito dudoso la mayoría de las veces) y los no matemáticos parecen pensar que un poco de aritmética o estadística descriptiva introduce en su trabajo un auténtico sabor a matemática profunda. Pese a ello, el libro merece ser leído.

Los veintisiete textos de las conferencias se ofrecen agrupados en once secciones. De ellas, sólo dos presentan un contenido puramente matemático. La primera consta de un texto de Procesi que, aunque está dedicado a investigación y enseñanza en matemáticas, constituye una magnifica reflexión sobre lo que hay que enseñar y una exposición de la programación no lineal por uno de sus creadores, H. Kuhn, carente de atractivo para los inexpertos. La segunda contiene un artículo sobre visualización, de Polthier, y otro sobre criptografía, de Languasco y Perelli.

Las *bellas artes* aparecen en cuatro secciones: pintura, cine, música y literatura. Capi Corrales, única española participante en la obra, escribe un excelente trabajo en el que analiza la evolución del concepto de espacio en la geometría y la pintura. Ofrece una significativa colección de *vidas paralelas*: Gauss y Goya (geometrías no euclídeas), Cantor y Seurat (dimensionalidad), Volterra y Monet (inicios de la topología) Hauusdorff y Kadinsky (formalización de los espacios abstractos). Este texto se complementa con el de un creador italiano, Perili, que utiliza la geometría como fuente de inspiración para su obra artística.

El cine está representado por un crítico, Emmer, y dos realizadores, Mosquera y Greenaway; los dos primeros hablan de la película *Moebius*. El tercero establece una serie de reglas de carácter empírico, importantes para hacer una buena película. Aunque pueda parecer aventurado imponer reglas de este tipo, hay reglas, como la célebre ley de Bode, que se han establecido con menos ejemplos.

Relacionado con la música es el trabajo sobre la modelización de algunos instrumentos de percusión (Tedeschini Lalli) y el dedicado a las claves numéricas de la música asiática (Quang Hai). La literatura está representada por las colaboraciones de Odifreddi (la numerología no puede faltar en este tipo de eventos) y Russo, que hace una curiosa comparación entre la retórica y la demostración matemática.

La sección de matemáticas e historia contiene tres artículos dedicados, respectivamente, a las matemáticas en la Italia fascista, en la Alemania nazi y en la Rusia a fines del zarismo. El segundo se ciñe a una exposición sumaria de algunas biografías de matemáticos afines al nazismo o perseguidos por éste. El primero, el más discutible, manifiesta unas opiniones que no encajan mucho con el conocimiento que el autor de estas líneas tiene de esa época, a través de persona tan poco sospechosa como Oscar Zariski, que vivió en ese momento y estuvo íntimamente ligado a alguno de los protagonistas más notables de la historia, Severi de un lado y Enriques y Castelnuovo del otro.

La economía es uno de los campos que admiten que las matemáticas son herramienta esencial para su desarrollo. Lamentablemente el artículo general sobre el tema se limita al período 1494-1969, omitiendo los últimos cuarenta años, en los que la relación entre ambas disciplinas ha crecido exponencialmente y alcanzado campos de las matemáticas que en 1969 se consideraban en el último extremo de la abstracción; el trabajo del español Mas Colell es un buen ejemplo de ello. El segundo artículo, de los mismos autores Basile y Li Calzi que el primero, da noticia de la obra de algunos matemáticos ganadores del Nobel (en economía): Debreu, Arrow, Nash y Kantorovich.

Completan la obra secciones sobre matemáticas y medicina, matemáticas y Venecia y centros matemáticos. En resumen un libro que nos hace preguntarnos por qué razón la ciencia, y en particular las matemáticas, no se consideran, especialmente en nuestro país, como parte de la cultura.

—*José Manuel Aroca Fernández*

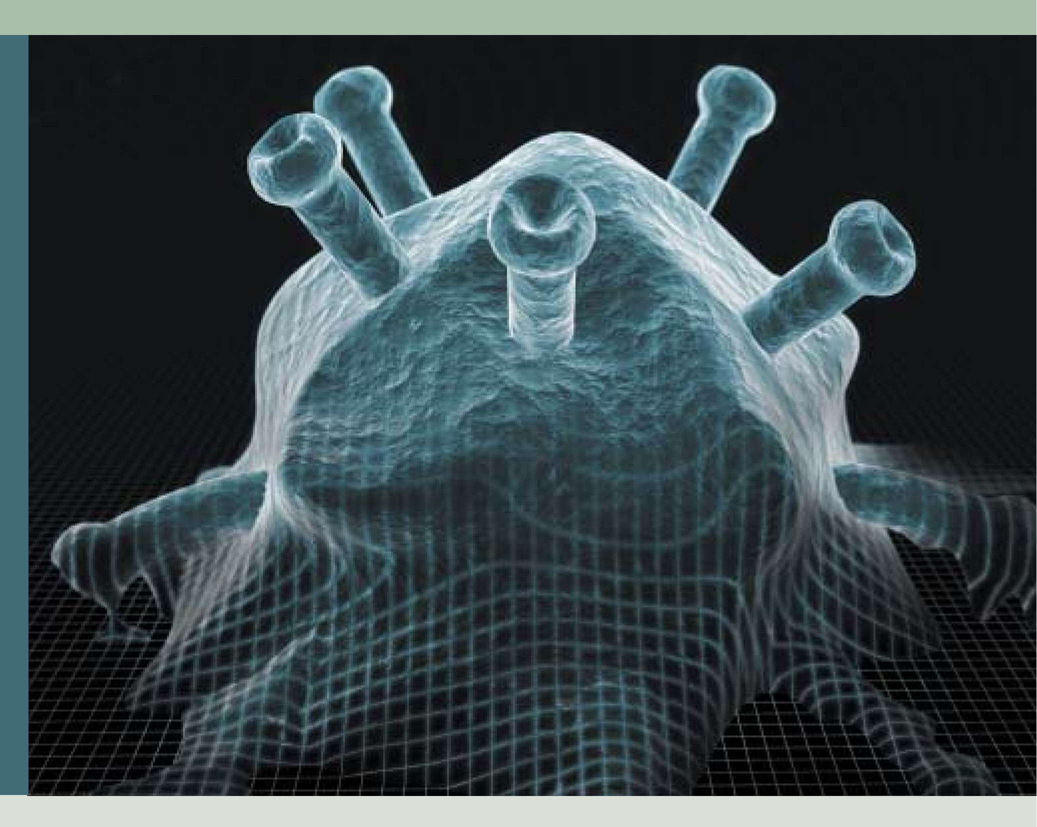
a su paso, se fueron estableciendo las bases de la embriología moderna a través de las investigaciones de Heinrich Rathke y Christian Pander. Rathke prestó particular atención a la organogénesis del sistema urogenital de los vertebrados, así como al desarrollo embrionario precoz de las aves, reptiles, mamíferos y humanos (*Von der "Entwickelungsmechanik" zur Entwicklungsbiologie*).

El progreso de la teoría celular permitió ahondar en la fisiología del desarrollo, iniciada por August Weismann y estructurada por Wilhelm Roux, Hans Driesch y Hans Spemann. La teoría de Weismann sobre el plasma de la herencia se basa en su descubrimiento morfológico de las líneas germinales como linaje celular. Postulaba que la herencia se funda en la transmisión de un sustrato material, dotado de una estructura molecular específica. Introdujo la separación entre plasma germinal y soma.

Sin embargo, sería la investigación en insectos lo que permitiría avanzar con paso firme en el estudio de la embriología comparada. Se refleja en las comunicaciones presentadas en la undécima reunión anual de la Sociedad Alemana de Historia y Teoría de la Biología, donde se homenajeó a un experto en dicho campo, Klaus Sander. Descubrió éste que las causas fisiológicas del patrón embrionario se originan, en forma de gradiente, a partir de los polos del huevo del insecto, no a partir de la porción central. En torno a esa misma cuestión de la información posicional, en los años setenta Lewis Wolpert propuso el modelo de la "bandera francesa" y Antonio García-Bellido un modelo de "compartimentos".

—LUIS ALONSO





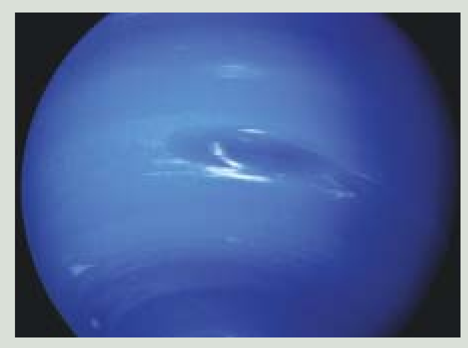
¿ESTAN VIVOS LOS VIRUS?, por Luis P. Villarreal

Los virus desafían nuestro concepto de "ser vivo". Sin embargo, constituyen piezas fundamentales del entramado de la vida.



OPTICA Y REALISMO EN EL ARTE RENACENTISTA, por David G. Stork

Recientes hallazgos ponen en duda que los pintores del siglo XV recurrieran a lentes y espejos para conseguir un inusitado realismo en sus obras.



EL CASO DEL PLANETA SUSTRAIDO, por William Sheehan, Nicholas Kollerstrom y Craig B. Waff

¿Se apropiaron los británicos de Neptuno?



EL ORIGEN DE LA MANO HUMANA, por David M. Alba, Salvador Moyà Solà y Meike Köhlner

El análisis estadístico de los restos de la mano de un hominino demuestra que las proporciones características de la mano humana no se deben a una adaptación ligada a la industria lítica.

MARIHUANA EN EL CEREBRO, por Roger A. Nicoll y Bradley E. Alger

La investigación sobre sustancias naturales que remedan los efectos de la marihuana en el cerebro podría arrojar luz sobre el dolor, la ansiedad, los desórdenes alimentarios, las fobias y otros trastornos.

